

Fabricación de materiales con gradiente funcional mediante LMD

J. N. Montero



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Laboratorio de aplicaciones del láser
Departamento de Ingeniería Industrial II
Universidade da Coruña
España

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres su constante apoyo y aliento sin el cual hubiera sido imposible terminar esta tesis. También quiero agradecer a mis tutores, Armando J. Yáñez Casal, María José Tobar Vidal y al profesor José Manuel Amado Paz, por su guía, consejo y apoyo durante todos estos años y por darme la oportunidad de participar en el magnífico trabajo que realizan. Quiero también agradecer a mis compañeros del LAIL en Ferrol, Javier Lamas Vigo sin el cual nunca hubiera iniciado este trabajo, a Félix Ledo y Ángel Rodríguez, por los buenos momentos y el apoyo que me han dado todos estos años. Finalmente quiero dedicarle un agradecimiento especial a mi hermano Pablo Montero Manso por la sobresaliente e incondicional ayuda que me ha dado estos años que ha sido inestimable para la consecución de esta tesis.

Resumen

El prototipado rápido de gradientes funcionales es un nuevo planteamiento del diseño de elementos mecánicos en el que se propone la posibilidad del control conjunto de la geometría de las piezas y de la variación en el espacio de las propiedades del material que las forman.

Este avance es una aplicación de las técnicas de fabricación aditiva que poseen la capacidad de depositar distintos materiales selectivamente. Lo que se busca es que mediante el diseño de variaciones graduales en la composición o estructura del material de una pieza, se consiga mejorar la respuesta de la misma a una solicitud determinada. La técnica de Deposición de Metales con Láser (LMD) puede ser adaptada para el control de la composición del material depositado mediante la introducción de una unidad de mezclado en el sistema de alimentación de polvo.

En este trabajo se han realizados varios pasos para caracterizar apropiadamente un sistema LMD y poder determinar cuando la realización con éxito de una pieza con gradiente funcional es posible. Se ha conseguido establecer cuando un gradiente es alcanzable y como modificar los parámetros del proceso para alcanzar la composición deseada en cada punto del volumen.

Resumo

O prototipado rápido de gradientes funcionais é un novo plantexamento do diseño de elementos mecánicos no que se propón a posibilidade do control conxunto da xeometría das pezas e da variación no espazo das propiedades do material que as forman.

Este avance é unha aplicación das técnicas de fabricación aditiva que posúen a capacidade de depositar distintos materiais selectivamente. O que se busca é que mediante o diseño de variacións graduais na composición ou estrutura do material dunha peza, se acade mellorar a resposta da mesma a unha solicitude determinada, e que isto leve á práctica sin necesidade de facer cambios no proceso de fabricación ou na planificación do mesmo. A técnica de Deposición de Metais con Láser (LMD) pode ser aditada para o control da composición do material depositado mediante a introdución dunha unidade de mesturado no sistema de alimentación do po.

Neste traballo realizáronse varios pasos para caracterizar apropiadamente un sistema LMD e pode determinar como e cando, a realización con éxito da construción de pezas con gradiente funcional é posible. Conseguiuse establecer cando un gradiente é alcanzable e como modificar os parámetros do proceso para acadar a composición desexada en cada punto do volume.

Abstract

Rapid prototyping of functionally graded materials is a novel approach to the design of mechanical elements that allows the control of the part geometry along with the spatial variation of the its material properties.

This advance is an application of the additive manufacturing techniques that are able to deposit materials selectively. The intended objective is the introduction of a gradual change in the composition or structure of a mechanical part, to obtain an improvement in its behavior. This has to be achieved in practice without making changes to the fabrication process or its planification. Laser Material Deposition (LMD) is a technique that can be adapted to control the composition of the deposited material by the introduction of a mixing element in the material transport circuit. However to achieve a correct selective deposition process, the precise control of the actuators that dose the feeding materials is necessary .

In this work different steps have been taken to proper characterize a LMD system in order to determine when the manufacturing of a certain functionally graded part is possible. It can be established if the deposition of a certain composition map is achievable and how to modify the parameters of the process to build the final part.

Índice general

Agradecimientos	II
Abstract	III
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Motivación	5
1.3. Organización de la tesis	8
2. Antecedentes	9
2.1. Materiales con gradiente funcional (FGMs)	9
2.1.1. Desarrollo de los FGMs	10
2.1.2. Áreas de aplicación	12
2.2. Técnicas de procesamiento de FGMs	13
2.2.1. Técnicas de Deposición para recubrimiento	13
2.2.2. Técnicas Pulvimetalúrgicas para grandes piezas	15
2.2.3. Técnicas de Fundición	16
2.3. Recargue por Láser	17
2.3.1. El prototipado rápido	17
2.3.2. Laser Cladding y la fabricación multimaterial	18
2.4. Composites de matriz metálica (MMC)	21
2.4.1. Desarrollo de los MMC	22
2.4.2. NiCrBSI-WC composites	23

3. Metodología	27
3.1. Generación de gradientes mediante deposición de volúmenes de com- posición homogénea	28
3.1.1. Uniones metálicas	28
3.1.2. Uniones con fase de refuerzo	31
3.1.3. Teselado, efectos de la generación de trayectorias	32
3.2. Generación de gradientes mediante deposición de volúmenes de com- posición heterogénea	34
3.2.1. Control del alimentador de polvo	35
3.2.2. Parámetros de la deposición	37
3.2.3. Generación de gradientes de concentración a partir de dos componentes	39
3.2.4. Control de la mezcla de polvo proyectada; metodología para determinar la tasa de cambio de composición	40
3.3. Sincronización del controlador de polvo con el sistema de posiciona- miento: Determinación del retraso de polvo	43
3.3.1. Monitorización de la emisión óptica del baño fundido	44
3.3.2. Medición del tiempo de retraso del polvo mediante sistemas de análisis de imagen	44
3.3.3. Ajuste del controlador de polvo: Respuesta dinámica del flujo másico	45
3.4. Métodos de inspección y análisis	46
3.4.1. Estudio de dureza	46
3.4.2. Inspección metalográfica de la calidad del recubrimiento	46
3.4.3. Medición de la dilución de la fase de refuerzo hacia la matriz	47
3.5. Estudio Estereológico de la fracción volumétrica de WC	48
3.5.1. Métodos de análisis de imagen	49
3.5.2. Cuantificación de las fases	52
3.5.3. Medición de la concentración en los gradientes	53
4. Configuración experimental	56
4.1. Actuadores en la instalación (LMD)	56

4.1.1.	Fuente Láser: ND:Yag Láser continuo Rofin 2KW	56
4.1.2.	Cabezal de LMD	56
4.1.3.	Sistema Posicionador: ABB Brazo Robótico 6-Ejes	57
4.1.4.	Alimentador de polvo: Sulzer Metco 10 Twin-C	57
4.2.	Materiales	58
4.2.1.	Metco12c – NiCrBSi.	58
4.2.2.	Deloro30 – NiCr hardfacing alloy	59
4.2.3.	Woka 3303 – WC.-Ni	59
4.2.4.	MetcoClad52001	59
4.2.5.	MetcoClad 316L - Si	60
4.2.6.	Sustrato de Acero AISI 316L	60
4.3.	Dispositivos de adquisición de datos y controladores.	61
4.3.1.	Fotodiodo: precitec LWM-T detector	61
4.3.2.	Sensores de Imagen:	61
4.3.3.	Iluminación	63
4.3.4.	Tarjeta de Adquisición DAQ	63
4.3.5.	PC	64
4.4.	Software y soluciones Software	64
4.5.	Configuración de la instalación LMD	64
4.5.1.	Disposición general de la instalación LMD.	64
4.5.2.	Aporte de gas.	65
4.5.3.	Posición del foco.	65
4.5.4.	Calibración del Polvo.	67
4.6.	Configuración del sistema de monitorización óptica.	68
5.	Resultados experimentales	72
5.1.	Resultados previos	72
5.2.	Deposición de MMC de Ni-WC con composición homogénea	73
5.2.1.	Superposición de capas de composición homogénea	76
5.3.	Deposición de MMC con gradientes continuos de Ni-WC	79
5.3.1.	Optimización de parámetros	80

5.3.2. Efecto del cambio de la composición sobre los parámetros del proceso	83
5.3.3. Limitaciones y calibración del sistema	84
5.3.4. Determinación del retraso del polvo	85
5.3.5. Validación del proceso: análisis de la señal del baño fundido .	87
5.3.6. Validación del proceso: análisis estereológico	89
5.3.7. Efectos del cambio de la composición sobre el material	91
6. Respuesta dinámica del flujo másico	94
6.1. Descripción del método: Inspección del flujo de polvo durante la deposición LMD mediante el análisis de imagen a alta velocidad	96
6.1.1. Desarrollo del modelo	97
6.2. Estudio del comportamiento del flujo másico mediante la monitorización basada en análisis de imagen	106
6.2.1. Implementación del método	107
6.2.2. Condiciones del experimento	108
6.2.3. Validación del modelo	109
6.2.4. Validación de la medición de flujo másico	111
6.2.5. Mediciones del comportamiento dinámico del flujo másico . . .	112
6.3. Tasa real de cambio de composición	114
7. Conclusiones	116
7.1. Deposición de materiales heterogéneos con LMD	117
7.1.1. Sincronización del alimentador de polvo	119
7.2. Realización de gradientes de composición Ni-WC	119
7.2.1. Concentraciones límite de WC	120
7.2.2. Deposición de cordones de composición heterogénea	120
7.2.3. Parámetros de deposición	121
7.3. Valoración de la técnica	121
7.4. Sistemas de imagen para la monitorización del flujo másico durante procesos LMD	123
7.5. Aplicación de los resultados	126

7.5.1.	Determinación de una metodología para fabricación de sólidos heterogéneos con alta repetibilidad	126
7.5.2.	Mejora en la operación y motorización de procesos Laser Cladding	127
7.5.3.	Contribución a las técnicas experimentales usadas en la investigación en materiales	128
7.5.4.	Monitorización de la masa en flujos multifásicos: Un problema extendido en la industria	128
7.5.5.	Finalmente dar un segundo uso a las instalaciones de recubrimiento por láser	129
7.6.	Trabajo futuro	130
Bibliography		132

Índice de figuras

3.1. Diagrama con el efecto sobre la estructura del material al depositar un gradiente con diferentes métodos	28
3.2. Diagrama del teselado de un sólido fabricado por deposición láser . .	33
3.3. Diagrama de la deposición de un cordón de composición heterogénea con LMD	34
3.4. Diagrama con la discretización de la función de distribución de composición para un punto dado ciertos parámetros de deposición	40
3.5. Gráfica de la tasa de cambio de composición con respecto a la velocidad	43
3.6. Diagrama sección del cordón depositado observada en las micrográficas;a ángulo de solape,b zona de dilución	47
3.7. Procesado de las imágenes para la detección de Carburos. Detalle . .	50
3.8. Imagen del proceso de segmentación de una metalografía con polvo de carburo esféricos	52
3.9. Imagen de la segmentación de una metalografía con polvo de carburo sinterizados	53
3.10. Diagrama de los cortes para la inspección de la fase de carburos en un cordón con gradiente	54
3.11. Metalografía de un gradiente longitudinal con respecto a la medición de concentración volumétrica de CW	55
4.1. Esquema de funcionamiento del alimentador de polvo	58
4.2. Imagen del cabezal de la instalación (YC30) durante la medida del retraso	63
4.3. Diagrama del circuito óptico del cabezal LMD	66

4.4. Diagrama de la disposición general de la instalación	66
4.5. Gráficas de la calibración del polvo	68
4.6. Gráfica de la configuración experimental para la medición del retraso	69
4.7. Configuración experimental para la monitorización de las partículas de polvo	70
5.1. Micrografía mediante SEM de cordones con distinta composición no- minal en peso de WC	73
5.2. Micrografía mediante SEM. Detalle de las fases presentes en el material	74
5.3. Micrografía mediante SEM análisis estereológico de proporción de carburos	75
5.4. Metalografías obtenidas mediante SEM de la superposición de capas de distinta concentración	76
5.5. Muestras obtenidas de la superposición de capas de distinta concen- tración, resultado de la prueba de líquidos penetrantes	77
5.6. Cabeza de una pala para una amasadora fabricada con LMD a escala 1/2, metalografía del recubrimiento con gradiente funcional	78
5.7. Gráficas correspondientes a los resultados del estudio paramétrico de morfología del cordón para Deloro30	80
5.8. Gráficas correspondientes a los resultados del estudio paramétrico de morfología del cordón para Woka	82
5.9. Corte transversal de una capa. Resultados del estudio del solape con los parámetros óptimos	82
5.10. Efecto de la composición en las características del cordón	84
5.11. Gráfica de la respuesta de los motores a un ensayo de salto	85
5.12. Gráficas de la tasa de cambio de composición posible contra velocidad	85
5.13. Efecto del retraso del polvo reflejado en la señal de la cámara y el motor	87
5.14. Gráfica de la respuesta de los sensores durante la deposición con tasa de cambio 2 %/mm Woka	88
5.15. Gráfica de la respuesta de los sensores durante la deposición Metco- Clad sobre Metco12c	89
5.16. Gráficas con las mediciones de composición a lo largo de dos cordones	90

5.17. Cambio de composición observado mediante EDX en los cordones y su efecto en la dureza	91
5.18. Efecto del cambio de composición 30 %wt-60 %wt sobre el cordón con diferentes potencias	92
5.19. Cortes de los cordones con cambio de composición 30 %wt-60 %wt con variación de potencia	93
6.1. Gráfica del árbol de probabilidades para el cálculo de P_G	103
6.2. Diagrama de flujo de las operaciones realizadas en la monitorización de flujo másico	107
6.3. Distribución de partículas por pixel en el sensor junto a la función de distribución correspondiente representada a escala	109
6.4. Ajuste del modelo a la muestra experimental de 1000 fotogramas a 5 % de la capacidad del alimentador	110
6.5. Ajuste del modelo con y sin el procesado para la eliminación de las detecciones dobles. Valores p 0.91 y 0.06	110
6.6. Gráfica con el resultado de las mediciones de flujo másico comparadas con la curva de calibración del alimentador	111
6.7. Gráfica del comportamiento dinámico del flujo de polvo ante variaciones de la señal del motor	113
6.8. Gráfica de la monitorización de una perturbación en comportamiento dinámico del flujo de polvo	114

Índice de tablas

4.1. Tabla con la composición de los materiales en polvo utilizados	60
5.1. Tabla con los valores de retraso obtenido con respecto a la tolva utilizada y el tamaño de partícula	87

Capítulo 1

Introducción

Los materiales con gradiente funcional (FGMs) son una clase de materiales compuestos (composites) que muestran una variación continua de sus propiedades a lo largo del volumen de una muestra. Esta variación continua de propiedades en el espacio es inducida por un cambio gradual de composición o estructura. Estos materiales fueron descritos por primera vez por Bever y Duwed y por Shen y Bever en 1972 [1] al observar una mejora del comportamiento de ciertos composites en puntos donde sus procesos de fabricación producían una disminución gradual de la fase de refuerzo. A partir de estas observaciones dedujeron que sería posible la aplicación intencionada de una graduación para mejorar las propiedades de un composite y propusieron distintas aplicaciones así como tipos de materiales con gradiente. Sin embargo este nuevo concepto de composites no fue desarrollado hasta más tarde, cuando en 1984 científicos japoneses en Sendai aislaron las primeras muestras experimentales [2] y las sometieron a ensayo. Durante el primer estudio de FGMs en Japón a finales de la década de los ochenta, se comprobó que la gradación de las propiedades térmicas y mecánicas a lo largo del volumen de una pieza, debidas principalmente a un cambio paulatino en su composición o porosidad, podían producir mejoras en la resistencia térmica y mecánica de la misma. Se concluyó además que los FGMs eran capaces de soportar condiciones que eran imposibles para materiales de composición uniforme. Estos resultados hicieron que se propusiera a los FGMs como sustitutos de los materiales tradicionales en aplicaciones de gran exigencia [3].

Hoy en día los materiales con gradiente funcional se utilizan habitualmente en

la industria aeroespacial, en maquinaria de generación de energía o en la fabricación de herramientas de mecanizado. Otros campos que también se benefician en menor medida de la introducción de FGMs son: arquitectura, medicina, electrónica o biotecnología [4].

La extensa diversidad de aplicaciones de los FGM ha dado lugar a una gran variedad de técnicas de fabricación, estas técnicas de fabricación se pueden agrupar en tres categorías: FGM generados a partir de polvo, FGM generados por transporte en estado fundido, FGM generados a partir de polímeros [5].

Desde finales de la década de los noventa los materiales con gradiente funcional generados a partir de polvo han sido objeto de mucho interés. Esto es debido principalmente a la aparición de técnicas de prototipado rápido que pueden usarse en su proceso de fabricación. Estas nuevas tecnologías poseen un alto grado de automatización electrónica que les permiten fabricar distintas geometrías y gradientes de composición en la misma máquina sin necesidad de modificaciones en el proceso o un aumento de coste cada vez que se realiza un cambio en el diseño.

Una de las técnicas que permite un proceso de prototipado rápido con polvo es la Deposición de Metales por Láser o LMD que es una evolución aplicada a manufacturación aditiva de una técnica de procesamiento superficial de materiales conocida como recargue por láser (Laser Cladding).

Esta técnica permite la generación de gradientes de concentración mediante un proceso de una sola fase, sin necesidad de sinterizado posterior o mecanizado. La fabricación automatizada de FGMs a partir de polvo sin sinterizado supone una gran ventaja respecto a otros métodos contemporáneos. Por esa razón varias líneas de investigación se han centrado en adaptar técnicas basadas en el recargue láser para realizar el prototipado de piezas usando materiales con gradiente funcional. En estos estudios se han conseguido reiteradamente muestras con un cambio de composición gradual, sin embargo muy pocos de estos estudios han sido capaces de obtener una pieza completa y las investigaciones que lo han logrado han expuesto diferentes aspectos problemáticos de la técnica.

Desde entonces poca evolución se ha observado comparando los primeros ensayos con los realizados hoy en día en lo que concierne a los problemas de planificación de

trayectorias y del control de composición para la fabricación de piezas con FGMs.

El trabajo presentado trata de resolver los problemas de del proceso de deposición con láser de sólidos multimateriales, tratando de abarcar los casos más generales posibles en los que la composición del sólido está determinada por una función de distribución arbitraria. Estos problemas son:

- Conseguir una composición precisa en cada punto del volumen del material de la pieza que represente con la mayor precisión posible un mapa de composiciones en tres dimensiones.
- Determinar un método de fabricación que permita realizar el mapa de composición más complejo posible con variaciones de composición simultáneas en las tres direcciones del espacio.

Para conseguir la deposición selectiva de una distribución arbitraria de materiales con LMD se puede aplicar una metodología general usada en procesos de fabricación aditiva, consistente en la segmentación del volumen del sólido en líneas rectas paralelas. Esto permite reproducir la geometría depositando cordones en una sola dirección ordenados en sucesivas capas superpuestas. Con esta planificación de trayectorias la composición del material de aporte se cambia sin interrumpir el movimiento, obteniendo un cordón de composición heterogénea.

La distribución de materiales en el interior del sólido queda determinada por los cambios de composición que se producen en la dirección de avance del posicionador a la vez que, en las direcciones transversales a esta, se establece un gradiente por la difusión de los materiales de distintas composiciones a través de la superficie de solape del cordón. Esta concepción de la fabricación de FGMs está poco estudiada y conlleva abordar los problemas más complejos que se pueden dar en un proceso de LMD. Tiene sin embargo la ventaja de que puede implementarse sobre una estrategia de fabricación estándar posible en la mayoría de máquinas de LMD y habilita la fabricación de un gradiente arbitrario de manera automática sin intervención humana lo que hace posible el prototipado de gradientes funcionales.

Cambiar la composición de un material en tiempo real es una tarea normalmente compleja y hasta la fecha no se han propuesto soluciones que satisfagan completa-

mente todos los requerimientos.

De partida el estudio asume que se utiliza una instalación convencional de recubrimiento por láser a la que se le incorpora un sencillo elemento para el mezclado de polvo en el circuito neumático de transporte del material. Usando esta instalación como supuesto, en el trabajo presentado, se estudia:

- La capacidad para obtener una composición determinada a partir de dos flujos de polvo con diferente naturaleza y composición.
- Como calcular los parámetros de aporte másico para producir un cambio de composición en tiempo real con la resolución requerida dada.
- La caracterización de los actuadores del alimentador polvo para procesos de deposición en el que interviene más de un circuito de alimentación.

En una segunda parte se complementa el proceso con el desarrollo de un sistema de monitorización de flujo másico para sistemas LMD. Este sistema permite verificar el comportamiento del polvo en tiempo real, con resoluciones en torno al milisegundo. Con este sistema se permite la monitorización del flujo incluso durante la deposición.

Finalmente se prueba el proceso de deposición de materiales en una instalación LMD típica y se realiza la deposición de cordones capas y bloques que muestran cambios graduales de composición. Se utiliza como material un composite de matriz metálica formado por el par NiCRBSi con refuerzo de WC donde el cambio de composición se consigue con la mayor o menor dispersión de las partículas de WC en la matriz. Se estudian un amplio rango de parámetros del proceso para especificar el límite de concentración de carburos que se puede depositar, el cambio de composición más alto que se puede obtener y el rango de funcionamiento del alimentador de la máquina que produce los mejores resultados de deposición para todas las composiciones abordables.

Este trabajo tiene como resultado la descripción de todas las características y elementos necesarios en una instalación para fabricación multimaterial con láser. Se pueden determinar también las limitaciones de la técnica y las especificaciones necesarias para el diseño de instalaciones futuras.

1.1. Objetivos

- Estudiar una metodología para depositar materiales selectivamente mediante LMD
- Estudiar las limitaciones y comportamiento de las instalaciones LMD a la hora de alcanzar una precisión dimensional determinada en la deposición selectiva de componentes de una mezcla en polvo.
- Estudiar las limitaciones y comportamiento de las instalaciones LMD a la hora de depositar un sólido con un mapa de composición de dos componentes.
- Aplicar los resultados del estudio a un composite de matriz metálica NiCrBSi con WC como fase de refuerzo.

1.2. Motivación

La idea de esta tesis tiene su origen en tres áreas muy distintas; las tecnologías de manufacturación aditiva e impresión 3D, el campo de investigación que forma el estudio de materiales con gradiente funcional dentro del campo de los composites y el estudio de las tecnologías de procesamiento de materiales con láser que, en particular se llevan realizando durante más de una década en el Laboratorio de Aplicaciones Industriales del láser de la Universidad da Coruña y situado en el Campus de Ferrol.

Entender como se origina este estudio dentro el marco tecnológico actual requiere dar un breve apunte a algunos avances que en los últimos 35 años han surgido en el ámbito de las tecnologías industriales de fabricación. La profunda transformación que ha sufrido este campo a causa de la integración de una electrónica cada vez más compleja, el consecuente abaratamiento de la potencia de cálculo y la popularización de nuevas herramientas, como el láser o el haz de electrones (EBM), ha llevado a plantear nuevos procesos de fabricación impensables medio siglo atrás. No menos disruptivo ha sido la continua aparición de nuevos materiales; metales amorfos, nuevos composites, FGM, espumas metálicas o nanomateriales. Los nuevos materiales requieren siempre nuevas técnicas de procesamiento y fabricación lo que genera un

propósito para la implantación y uso de nuevas tecnologías de fabricación que de otra manera quedarían relegadas al ámbito del laboratorio o la curiosidad científica. Esta sinergia entre la creciente capacidad técnica para la fabricación y el descubrimiento de novedosos materiales revolucionarios ha sido un impulsor continuo del campo de las técnicas industriales de fabricación y es el *primum movens* en la concepción de la idea para este trabajo.

A mediados de los años 80 aparecen en los Estados Unidos los primeros trabajos en estereolitografía con fotoreinas que dan lugar a la primeras impresora 3D estereolitográficas [6]. Por otro lado y al mismo tiempo, en Japón, investigadores de Sendai como parte de un proyecto para el desarrollo del programa espacial nipón obtienen las primeras muestras experimentales de materiales con gradiente funcional [2] predichas 10 años antes [1]. Paralelamente en el Imperial College de Londres, en el laboratorio del científico William Steen(honrado con un laboratorio dedicado en su nombre en la universidad de Vigo), se utiliza uno de los primeros láseres de CO₂ para depositar aleaciones metálicas a partir de distintas proporciones de dos materiales en polvo [7] dando comienzo a una nueva línea de investigación en las técnicas de recubrimiento con láser. Poco después de estos hechos, a principios de los noventa, continuando con la idea de Steen de mezclar diferentes materiales en polvo durante la deposición láser se comienza a fabricar en distintos laboratorios del mundo los novedosos FGM inventados en Japón. A mediados de los noventa diversos investigadores inspirados por las técnicas estereolitográficas de fabricación aditiva comienzan a fabricar piezas metálicas acumulando capas mediante la técnica de láser usada por Steen [8], inicialmente pensada para recubrimientos, dando origen a la deposición de metales por láser o LMD (término no utilizado en la época y acuñado en 2011), una nueva forma de fabricación aditiva. Poco después a finales de los noventa distintos investigadores presentan los primeros resultados combinando la fabricación aditiva y la fabricación de materiales con gradiente funcional introduciendo múltiples materiales en una pieza fabricada por LMD. Esta idea de fabricación multimaterial tiene su análogo en otros métodos de fabricación 3D contemporáneos [4]y a lo largo de la primera década del siglo XXI surge el concepto de prototipado rápido de materiales con gradiente funcional en un claro paralelismo al concepto de prototipado rápido

que había nacido con la estereolitografía 15 años antes solo que con láseres mucho más potentes y FGM en vez de fotoreinas.

El prototipado de materiales con gradiente funcional es un nuevo planteamiento del proceso de fabricación de una pieza, que tiene su origen en la capacidad de distribuir diferentes materiales con precisión durante el proceso de adición de material en la fabricación aditiva. Esto significa que el resultado final puede no solo tener virtualmente cualquier geometría sino que además es posible el ajustar libremente las propiedades del sólido cambiando la composición de la pieza en ciertas regiones de la misma [10]. Esta capacidad tiene un gran impacto en todo el proceso de fabricación partiendo desde el diseño hasta la selección de los materiales y la funcionalidad de la pieza. Traduciéndose en la posibilidad de añadir funcionalidades a una pieza sin necesidad de incrementar su coste de fabricación y cuanto más compleja sea esta y más funcionalidad tenga más rentable será el uso de la nueva técnica, al mismo tiempo que el diseño del conjunto convergerá hacia un número menor de piezas.

Este es uno de los motivos para realizar el trabajo presentado; encontrar un método para realizar procesos de prototipado de materiales con gradiente funcional en instalaciones diseñadas para procesos de recubrimiento y fabricación LMD convencionales.

Existe un segundo propósito en este trabajo; durante el desarrollo en Japón de los FGM y en los 10 años inmediatamente posteriores, se desarrollaron múltiples técnicas para fabricar distintos materiales con gradiente- Se experimentó con muchas soluciones y materiales pero muy pocos sistemas de fabricación de FGM salieron de la fase de laboratorio [9]. La producción de FGM es normalmente lenta costosa y no posee una fiabilidad alta. El otro aspecto importante del trabajo está centrado en este punto; y consiste en desarrollar los métodos de fabricación de FGM con sistemas de deposición de metales con láser persiguiendo el objetivo de subsanar los problemas que actualmente la fabricación de FGM presenta.

1.3. Organización de la tesis

La tesis está dividida en 7 capítulos con cuatro importantes bloques que condensan la descripción del trabajo realizado y los resultados obtenidos. El primer bloque está dirigido a introducir el tema, los conceptos previos y definiciones más relevantes así como la revisión del trabajo realizado previamente en el campo y abarca los capítulos 1 y 2. El segundo bloque está compuesto por el capítulo 3 que está destinado a la descripción de las hipótesis de partida y los problemas a abordar así como a la exposición de las soluciones desarrolladas durante el transcurso de la investigación. El tercer bloque describe el trabajo experimental. Está dividido en dos capítulos 4 y 5. En el primero se describen las instalaciones elementos y materiales utilizados en la investigación así como los métodos experimentales y de análisis. El segundo presenta los resultados obtenidos en los experimentos realizados, así como la comprobación de las ideas propuestas en el capítulo 3.

El cuarto bloque, formado unicamente por el capítulo 6, es más pequeño en extensión. En el se describe el estudio del comportamiento dinámico del flujo de polvo en procesos LMD. Esta materia has sido separada con el propósito de facilitar su comprensión.

El último capítulo está dedicado a cerrar el trabajo, se aportan las conclusiones de la investigación así como un resumen de las resultados más importantes. Se explica con detalle los objetivos alcanzados y el impacto de los mismos. Para finalizar se describen las tareas para continuar en el futuro y los frentes que deja abiertos la investigación realizada.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Materiales con gradiente funcional (FGMs)

Los materiales con gradiente funcional son una clase de material compuesto o composite de composición no uniforme, formado por dos o más fases constituyentes que muestra una variación regular de composición acorde a una función espacial determinada. Esta distribución no homogénea de sus componentes tiene una finalidad específica como puede ser el ajuste de sus propiedades térmicas, estructurales, mecánicas o biológicas para responder a las condiciones de una aplicación concreta.

En los casos más habituales un FGM tendrá entre dos superficies del sólido una variación continua de la concentración de una fase o componente disperso sobre una matriz de otro componente. Lo que generalmente reducirá los efectos negativos de la fase dispersa en el composite mientras que proporcionará unas superiores propiedades locales que son las supuestamente demandadas. El resultado es normalmente una notable mejora del comportamiento del material ante una solicitud determinada, tensiones, desgaste, choque térmico etc. Actualmente esta clase de materiales representa el frente de vanguardia de la investigación en materiales siendo objeto de atención mundial. Estos materiales tienen un amplio campo de aplicaciones incluyendo biomecánica, biomédica, automoción, aeroespacial, mecánica, civil, nuclear e ingeniería naval. Nuevas aplicaciones son descubiertas y desarrolladas continuamente en este campo.

2.1.1. Desarrollo de los FGMs

El estudio, investigación y desarrollo en el campo de los materiales con gradiente funcional comenzó activamente a finales de la década de los 80 [2], a pesar de que la primera publicación sobre el tema apareciera en 1972 [1]. En 1972 Shen, Bever y Duwez notificaron las cualidades beneficiosas que poseían los composites con gradiente, consideraron posibles tipos de gradientes en composites y sus propiedades así como discutieron sus posibles aplicaciones. Algunos de los ejemplos de composites con gradiente conocidos a principios de los 70 [1] eran, largerillos para las aeronaves formadas por composites de aluminio y boro donde los filamentos de boro eran colocados selectivamente para permitir la flexión. Se habían producido palas para turbinas de gas en los 70 a partir de un cermet de carburo de titanio con una aleación de níquel que hacía de matriz. La concentración de carburo de Titanio era máxima en el interior del perfil del álabe donde las mayores tensiones tenían que ser soportadas a altas temperaturas. La composición del cermet con gradiente era esencialmente aleación pura en la base y en la punta del perfil para los cuales los requerimientos principales eran ductilidad y tenacidad. También se probaron blindajes experimentales con gradientes de partículas de molibdeno en una matriz de óxido de aluminio utilizando técnicas de pulvimetalurgia estándar de la época.

En 1987 con el fin de desarrollar materiales estructurales avanzados para el escudo térmico de futuros programas espaciales un proyecto del gobierno japonés titulado, investigación en tecnología básica para la relajación del stress térmico, es financiado entre 1987 y 1991. Tenía como objetivo fabricar piezas experimentales con gradiente funcional más grandes y poseyendo formas complejas. La fabricación de placas de recubrimiento cuadradas de 300mm para ser usadas en los fuselajes de las lanzaderas espaciales o cazos semiesféricos de 50mm de diámetro para las ojivas de los cohetes entre otros fueron llevados a cabo con éxito [2]. Esta iniciativa fue continuada con la formación del Foro de FGMs en 1988 que organizó el primer simposio en FGMs (1990 Sendai, Japón). Tras esto el número de publicaciones en este área comenzó a crecer rápidamente. Entre el primer y segundo simposio FGMs (1992 San Francisco USA) aparecen estudios de varios métodos de procesamiento de FGMs como: Proyección, PVD, CVD, SHS, pulvimetalurgia para diversos campos de aplicación [3]. Tras el

éxito del primer proyecto le siguen otro nuevo Desarrollo de sistemas termoeléctricos de alta eficiencia para la conversión híbrida directa de energía. China también se embarcó en la exploración e los FGMs en 1987. Los estudios comenzaron en la universidad de Wuhan, seguidos de otras instituciones de investigación. En 1990 China estableció un programa nacional de FGMs titulado Programa de alta tecnología de China 863. Desde ese momento el desarrollo en diseño de materiales, procesado y evaluación empieza a llevarse a cabo de manera sistemática a nivel internacional. En los Estados Unidos el gobierno, organizaciones públicas y compañías privadas comenzaron a realizar algunos estudios. (Idaho National laboratory, MIT, Bureau of Mines). Programa federal en ciencia de material y tecnología(1993) Materiales con gradiente funcional 1994. En Europa las actividades de investigación en FGMs comienzan tarde con respecto a Japón o USA. A excepción de suiza donde los trabajos comienzan en 1986 y no es hasta 1994 que la Unión Europea crea un grupo de gestión en FGMs y composites para coordinar los estudios en todos los estados miembros.

La mayor parte de los avances en FGMs se llevan a cabo en laboratorio sin que haya una clara adaptación a la producción en masa. A lo largo de los 10 años que siguen a los primeros proyectos, la capacidad para fabricar FGMs en laboratorio alcanza una sólida madurez. Las técnicas se desarrollan y perfeccionan hasta que es posible crear gradientes de casi cualquier material. A principios de los 2000 también se establecen técnicas de fabricación de FGMs de forma libre. Estas técnicas de fabricación aditiva poseen numerosas ventajas, mayor velocidad de producción, menos uso de energía, mayor uso de material, y la capacidad de producir formas complejas. Ejemplos son: Selective Laser Melting, Selective Laser Sintering, Laser Cladding [4] [5]. Hoy en día el principal escollo para la adaptación por parte de la industria de los FGMs sigue siendo el alto coste de fabricación. Algo que podría cambiar con la introducción de las técnicas de fabricación de forma libre para la producción de FGMs.

2.1.2. Áreas de aplicación

Las áreas de aplicación más importantes de FGMs tal y como se explica en [4] son:

Aeroespacial

Los FGMs pueden resistir gradientes térmicos muy grandes, lo que los hace adecuados para su uso en estructuras aerodinámicas o en los componentes para los motores de los cohetes. Si las técnicas de procesamiento son mejores los FGMs podrían usarse en una mayor cantidad de áreas de la industria aeroespacial.

Medicina

Para reemplazar tejidos huesos y dientes, que son FGMs naturales, lógicamente los mejores candidatos son materiales con gradientes funcional. Los FGMs ya se usan en una amplio rango de aplicaciones en la industria dental y ortopédica.

Defensa

Una de las características más importantes de los FGMs es su habilidad para inhibir la propagación de grietas. Esto los hace útiles en aplicaciones militares, como materiales resistentes a la penetración para placas de blindaje y chalecos antibalas.

Energía

Los FGMs son usados en dispositivos de conversión de energía. Se aplican como barreras térmicas y son usados también como recubrimientos de las palas de las turbinas de gas.

Optoelectrónica

Aunque menos relevante para el campo en el que se engloba este trabajo, los FGMs también tienen aplicación optoelectrónica como materiales con índice de refracción graduado en discos de almacenamiento de audio o vídeo.

Mecánica

Otros campos de aplicación son los recubrimientos para herramientas de corte, componentes de motor de automóvil, intercambiadores de calor, sensores, puertas contra incendios, etc.

2.2. Técnicas de procesamiento de FGMs

Para la fabricación de materiales de gradiente funcional existen gran cantidad de distintos tipos de técnicas de procesamiento, condicionadas tanto por la naturaleza de los materiales que van a producir el gradiente como por la geometría de la pieza y el tamaño del gradiente que se desea generar. Muchas de estas técnicas son únicamente aptas para su uso en laboratorio teniendo costes prohibitivos para su adaptación a la industria. Otro aspecto importante es resaltar que muchas de estas técnicas solo permiten la creación de finos recubrimientos con gradientes funcionales y no son aptos para la fabricación de piezas con gradientes de gran tamaño. La información presentada en esta lista puede ser encontrada con mas detalle en [5] [11]

2.2.1. Técnicas de Deposición para recubrimiento

Deposición química de vapor (CVD) y Deposición física de vapor (PVD)

Estas técnicas de deposición de vapor obtiene excelentes microestructuras, pero solo pueden ser utilizadas para depositar finos recubrimientos superficiales. Estas técnicas además necesitan de mucha energía y producen gases peligrosos como residuos.

Electrodeposición

En esta técnica los recubrimientos son generados por la reducción de una sustancia coloidal en un baño al aplicar una corriente eléctrica constante entre un cátodo y un ánodo. El material en suspensión se reduce en el ánodo y va quedando depositado a lo largo del tiempo. Para generar el gradiente se añade un material al baño cambiando la composición de este durante el proceso y consecuentemente cambiando la

composición del material que se va depositando. Las ventajas de este sistema es el equipo de bajo coste al no utilizar sistemas de vacío o alta temperatura. Solo puede ser utilizado para generar recubrimientos y en general se tiene un gran control sobre la microestructura del material depositado.

Deposición electroforética EDP

Consiste en dos procesos, el movimiento de partículas de polvo cargadas y suspendidas en un líquido bajo un campo eléctrico aplicado entre dos electrodos seguido de la deposición de esas partículas en uno de los electrodos. Con este sistema se pueden obtener materiales con gradiente ya que la composición de las capas sucesivas de polvo está determinado por la composición de la suspensión en el momento de la deposición. Este sistema no consigue piezas totalmente densas y puede ser necesario un tratamiento posterior. Este método tiene un coste bajo, es bastante rápido y permite hacer gradientes de formas complejas.

Deposición asistida por haz de iones IBAD

Esta técnica para realizar recubrimientos combina la deposición física de vapor con una técnica de implantación de iones. Controlando la tasa de implantación iónica a medida que se deposita el vapor, se pueden generar finos recubrimientos de un material con gradiente funcional.

Síntesis por autopropagación a alta temperatura SHS

En esta técnica se preparan varias mezclas de materiales reactivos con distinta composición, que se disponen en capas que se apilan para formar un gradiente. Mediante la aplicación de corriente o calor se inicia la reacción exotérmica de los materiales en las capas, alcanzándose temperaturas por encima del punto de fusión y la reacción va avanzando capa tras capa creando una mezcla que al solidificarse da lugar al FGMs. La porosidad puede ser un problema, pero puede reducirse considerablemente aplicando presión durante el proceso.

Proyección por plasma

Es una técnica de recubrimiento que utiliza polvo como material de aporte que puede ser fácilmente adaptado para la fabricación de gradientes añadiendo una unidad de mezclado en la cadena de aporte. El material es fijado mediante una pluma de plasma que funde el polvo durante el proceso. El resultado muestra porosidad y la unión con el sustrato no es total

2.2.2. Técnicas Pulvimetalúrgicas para grandes piezas

El proceso de pulvimetalurgia para el procesamiento de materiales incluye la producción de polvo, su procesamiento, las operaciones de conformado y sinterizado o consolidado en caliente asistido por presión. Se encuentran disponibles en el mercado polvos de muchos metales aleaciones composites y materiales cerámicos con tamaños de partícula abarcando desde el nanómetro hasta varios cientos de micrómetros. Dado que los materiales está dispersos en pequeñas partículas individuales poseen condiciones casi ideales para fabricar materiales con gradiente de composición o microestructura utilizando las partículas de polvo como bloques de construcción.

Sinterizado

El funcionamiento de estas técnicas tiene dos pasos. El primero consiste en la formación de un bloque compacto con gradiente a partir del polvo. El segundo paso es el sinterizado propiamente dicho. Para el primer paso hay diferentes técnicas de formación de gradiente de polvo, véase [5], entre ellas distintos procesos de fabricación aditiva. Una vez que el gradiente ha sido formado es necesario preservarlo durante el sinterizado, cuando se somete el bloque a presión o temperatura ya que el filtrado o la difusión de algún elemento puede producir la desaparición del gradiente. El resultado de estas técnicas suele tener densidades más bajas que las de un bloque del mismo material producido por otra técnica. Es habitual la porosidad y una reducción de las propiedades mecánicas.

Recargue por láser

Es una técnica de recubrimiento que utiliza polvo como material de aporte que puede ser fácilmente adaptado para la fabricación de gradientes añadiendo una unidad de mezclado en la cadena de aporte. El material es fijado mediante un haz láser que crea un baño de material fundido que atrapa las partículas de polvo.

2.2.3. Técnicas de Fundición

la formación de gradiente puede obtenerse mediante procesos de transporte en estado fundido y su consecuente solidificación. El procesamiento mediante fundición está muy extendido para los FGMs que contienen un metal como constituyente.

Fundición centrífuga de metales

En el proceso de fundición centrífuga de metales, las partículas de una fase refractaria se dispersan en un metal fundido. Estas partículas pueden estar formadas in situ durante el enfriamiento del fundido o dispersadas en un paso previo. Las diferencias de densidades entre las partículas y el metal fundido lleva a la formación de un gradiente de concentración de partículas si el proceso de fundición es realizado en una centrifugadora. Se han llegado a utilizar partículas con mayor y menor densidad que el del material fundido para la fabricación de tubos donde se necesitaba reforzar las paredes interiores y exteriores del mismo [5].

Moldeado con inyección controlada

En un proceso de fundición por gravedad, el molde se rellena parcialmente con la primera colada y en un paso posterior una segunda colada se introduce en el molde sobre el primer material parcialmente solidificado. La formación del gradiente ocurre mediante convección natural o forzada, y el ancho del gradiente se controla mediante el grado de solidificación del primer material. En una modificación de este método la fundición se realiza en un molde rotatorio y pueden obtenerse componentes cilíndricos.

2.3. Recargue por Láser

El recargue por láser o Laser Cladding es una técnica de tratamiento superficial para la generación de recubrimientos metálicos que utiliza una fuente de calor láser para depositar una capa de metal sobre la superficie de otro material que se denomina sustrato. El metal depositado que forma el recubrimiento puede ser transferido al sustrato por varios métodos: inyección de polvo, polvo predepositado, o mediante alimentación de hilo. Entre todos estos métodos la inyección de polvo es el sistema más práctico y popular hoy en día. Desde el punto de vista físico el proceso consiste en la focalización de un haz láser con una alta densidad de potencia sobre un pequeño punto en la cara superior de un material fundiéndolo superficialmente. Un segundo material, que formará la capa de recubrimiento, se hace coincidir con esta área fundida. Este segundo material se funde a su vez por efecto de la conducción térmica y de la propia energía del láser y los dos materiales en estado fundido se mezclan. El haz láser se desplaza por la superficie y el material fundido se solidifica rápidamente. El proceso de fusión aporte de material y solidificación se va repitiendo continuamente mientras el láser se va desplazando generando una capa sobre el sustrato. Mediante esta técnica se pueden depositar una gran variedad de materiales sobre diferentes sustratos. El recargue por láser es una evolución, utilizada hoy en día, de otras técnicas para la realización de recubrimientos metálicos anteriores, como soldadura de arco o la proyección térmica. El Laser Cladding destaca por sus numerosas ventajas sobre estas otras técnicas de recubrimiento tradicionales, consiguiéndose recubrimientos de mejor calidad, con poca dilución, poca distorsión dimensional, mejor acabado superficial y mayor densidad en el material depositado. Esta técnica también ha mostrado tener ventajas para la realización de prototipado rápido.

2.3.1. El prototipado rápido

El prototipado rápido es un término que hace referencia a cualquier proceso que posea la capacidad de producir una representación física de un objeto definido por un modelo 3D de manera precisa, automática y en un único paso de adición de material.

Con el matiz añadido de que el sólido generado funcione como una representación (o prototipo) de otro objeto, pieza final o producto acabado para fines informativos, estudio o ensayo.

El prototipado rápido se origina con el desarrollo de la estereolitografía entre 1986-1988 [12] Y en un lapso bastante pequeño de tiempo esta idea se extendió con invenciones como la fabricación de objetos laminados (LOM), el sinterizado selectivo por láser (SLS), el recargue láser, el modelado por deposición fundida y la impresión 3D. A principio de la década de los 90 ya se habían desarrollado la mayoría de procesos de prototipado que se usan hoy en día [13]. El uso del recargue láser para la fabricación de sólidos data de esas fechas, y en 2010 por parte del comité ASTM F-42 con la primera normativa ASTM F2792-10 aparece el primer trabajo de estandarización, donde el prototipado rápido se engloba dentro de la fabricación aditiva y el proceso basado en recargue láser que se utiliza para la fabricación por capas recibe el nombre de Deposición de Metales por Laser o LMD y se engloba dentro de un grupo más amplio de técnicas de prototipado rápido con el nombre de deposición mediante haz de energía.

2.3.2. Laser Cladding y la fabricación multimaterial

La utilización de Laser Cladding con alimentación en polvo para depositar materiales con gradiente funcional es un paso lógico si se tiene en cuenta que el Laser Cladding constituye en cierta manera una técnica de Pulvimetalurgia. La Pulvimetalurgia desde un primer momento [4] es una de las principales vías para la fabricación de FGMs e incluso anteriormente a la aparición de los FGMs en los estudios realizados por Bever y Duved en la década de los 70 mencionan las propiedades excepcionales que mostraban ciertos composites con gradiente generados por Pulvimetalurgia. Tampoco es de extrañar que, a día de hoy, existan una gran variedad de ejemplos en la literatura de sistemas para la fabricación de FGMs usando dispositivos de aporte de polvo y mecanismos de aplicación de energía térmica que posean cierta similitud con el sistema utilizado en procesos de Laser Cladding o en procesos de LMD. Hay que tener en cuenta que el Laser Cladding es una técnica de tratamiento superficial para la creación de recubrimientos sobre componentes metálicos

que se desarrolla a partir de otras técnicas de proyección térmica como proyección por plasma y proyección por llama. Esta última utilizada desde principios del siglo XX. A pesar de que los procesos no son exactamente los mismos, la fabricación de FGMs es posible y ha sido estudiada también para estos sistemas. Encontramos ejemplos de ello en la bibliografía en los noventa [14] [15].

El Laser Cladding se origina en algún momento en la segunda mitad de los años 70 [16] poco después de la aparición de los láseres de CO₂ de alta potencia. El primer uso del Láser Cladding para la obtención de materiales a partir de distintos componentes en polvo se produce con la intención de estudiar el desarrollo de nuevas aleaciones. A mediados de los años 80 T Takeda, VM Steen, RDF West 1984 [17] consiguen alear en un baño fundido generado mediante láser de CO₂, tres materiales distintos (Fe Cr y Ni) utilizando un dispositivo de alimentación de polvo compuesto por tres tolvas una para cada componente de la aleación. Las tolvas conflúan en una tubería para el transporte del material y este era impulsado con argón a presión hacia el punto donde se encontraba el substrato fundido. Esta capacidad de combinar materiales mediante Laser Cladding lleva a intentar la fabricación de sólidos multimateriales, propuesta por Monson Steen y West en 1987 [18]. Esta idea es vista como una manera de estudiar con más precisión y eficiencia las propiedades de distintas aleaciones en la deposición con láser.

A principios de los 90, se realizan diversos estudios demostrando la viabilidad de fabricar cordones con variación de composición y la posible aplicación a muy diversos materiales. Abbas y Steen, 1988, estudian el proceso de inyección de partículas de Carburo de Silicio en acero En3b. E Carvaho et al, 1990, crean gradientes Co-Ni-Al con dos tolvas [19] [20] [21], McKeown et al 1991 gradúan un composite de partículas Carburo de silicio en Stellite 35, M. Ellis Xiao et al 1992 usan una triple tolva Ni, Cu y Pb y C. L. l Sexton et al, 1993, utilizan tres tolvas para estudiar las propiedades de las aleaciones generando mapas de variación de 3 componentes. Más información acerca de estos trabajos de principios de los noventa puede encontrarse en la revisión realizada por Sexton et al. [22]

La generación de FGMs para su incorporación en una pieza es propuesta por K. Mohammed Jasim, R. D. Rawlings, D. R. F. West y Abboud utilizando dos com-

ponentes para generar cordones con distinta composición que se solapan creando un gradiente de composición escalonados a lo largo de una capa 1993 [23]. Otra propuesta similar usando Laser Cladding es la creación de dos capas superpuestas con distinta composición para generar un gradiente de composición normal a la misma 1994 [24] con lo que es posible crear recubrimientos con gradiente de hasta 4 mm de Ni-Al 1995 [25], superponiendo dos y tres capas. Hasta el momento los estudios tenían como objetivo la búsqueda de los mejores parámetros para un material, más que la fabricación de una pieza con variación en sus propiedades. Sin embargo este método para generar gradientes escalonados se vuelve extremadamente popular y se utiliza en la mayor parte de estudios sobre FGMs en Laser Cladding posteriores.

La generación de materiales con gradiente funcional con Láser Cladding en este momento ya es una realidad, y su estado de desarrollo es comparable a lo que se había alcanzado con otras técnicas, pero el paso a la fabricación de piezas de forma libre con introducción gradientes como parte del propio proceso de fabricación no se propone hasta finales de los noventa.

A finales de los noventa Michele Griffit [26] plantea el uso de ambos principios para la fabricación de materiales con gradiente funcional en un entorno de fabricación aditiva comercial llamado LENS . El sistema LENS de Griffit es una técnica de deposición de metal con láser fundamentalmente idéntico al LMD. Utiliza dos alimentadores y permite generar gradientes escalonados en capas superpuestas de manera similar a los propuestos anteriormente, pero por primera vez permite incorporarlos a una pieza de geometría determinada en un modelo de CAD.

Al mismo tiempo Fessler et al. [27] ponen a prueba la idea de fabricación aditiva multimaterial fabricando una pieza para un molde de inyección a partir de tres materiales (Cu, Invar, acero inoxidable). Hacen uso de la técnica SDM(Shape Deposition Manufacturing) aplicada a la deposición de metales, lo que en la práctica conlleva una instalación LMD junto con una fresadora y son capaces de generar gradientes escalonados y graduados utilizando cambios discretos de composición.

La idea de una Fabricación Aditiva que permita controlar la forma y la composición del material empieza a tomar fuerza en la década de los 2000. En 2002 Mark.T y Griffit [28] continúan con el trabajo en manufacturación aditiva con gradientes fun-

cionales del sistema LENS y estudian la posibilidad de realizar piezas con gradientes utilizando cordones con cambio de composición. Esta nueva idea permite realizar capas con gradiente de forma libre pero requiere un cuidadoso control del alimentador de polvo. Construir controles del flujo másico es un problema inherentemente difícil. Los autores concluyen que el análisis de las muestras permite determinar el retraso del polvo y de esa manera definir los parámetros necesarios en el controlador del alimentador para el correcto posicionamiento del inicio del gradiente en la pieza. Esto es insuficiente para realizar un proceso completo de fabricación multimaterial y puede producir un resultado erróneo debido a que no se tiene en cuenta las tasa de masa totales del cordón. En 2003 Shin, Ki Hoon, Mazumer continúan con la idea de Fessel y proponen un procedimiento general para la fabricación aditiva multimaterial [29]. En este se realiza el modelizado numérico de la pieza, a partir de las especificaciones del diseñador, se realiza la planificación de trayectorias y se genera la pieza de manera experimental. Los gradientes generados por este procedimiento están producidos por deposición de áreas de composición homogénea con distinto grado de mezcla de dos componentes, La idea es puesta a prueba fabricando un anillo de dos componentes Cu-Ni. El uso de Laser Cladding para fabricación de piezas multimaterial ha ido apareciendo regularmente durante los últimos 10 años tanto usando cordones con cambio de composición como cambiando la composición entre capas. En 2007 Wang [30] propone una nueva manera de producir cordones con cambio de composición utilizando un sistema mixto que utiliza hilo y polvo como medio de aporte de material. Pero aparte de esto no se desarrollan nuevas soluciones para la fabricación multimaterial o FGMs mediante fabricación aditiva con LMD.

2.4. Composites de matriz metálica (MMC)

Los composites de matriz metálica son materiales que poseen al menos dos fases distintas (química y físicamente), adecuadamente distribuidas para obtener propiedades que no es posible obtener con ninguna de las fases individualmente. Generalmente solo se encuentran dos fases una matriz y otra fase que puede aparecer en forma de fibras o partículas. Ejemplos de este tipo de materiales compuestos pueden

ser composites de fibras de alúmina en matriz de Aluminio o partículas de carburos de tungsteno en matriz de Cobalto o Niquel [33]. Las principales ventajas con respecto a los metales ordinarios son reducciones de coste debido a una mejora en algunas propiedades mecánicas específicas, mejor estabilidad dimensional y mayor resistencia a altas temperaturas y ciclos de fatiga. Una de los requerimientos de todo MMC es que debe tener un metal o una aleación metálica como matriz. El refuerzo puede ser de naturaleza metálica o cerámica.

- Los MMC pueden clasificarse en cuatro grupos principales:
 - MMC reforzados con partículas
 - MMC reforzados con fibras corta
 - MMC reforzado por fibra continuada
 - MMC laminado

Las principales cualidades por las que destacan los MMC son: mejora de la rigidez estructural y tenacidad, control de la expansión térmica y resistencia al desgaste.

2.4.1. Desarrollo de los MMC

Los composites de matriz metálica se desarrollan a partir de una nueva línea de investigación motivada por la necesidad de incrementar la cualidades y reducir el coste de equipamientos militares [31]. El abaratamiento que supone su aparición lleva a una comercialización más allá de la ingeniería, producción y servicio de las aplicaciones militares originales, consecuencia de la experiencia ganada en los programas de armamento. A principios de los 70 se establece las primeras aplicaciones de los MMC comerciales. Sin embargo en esta época esta es todavía una tecnología en proceso de maduración.

Durante la crisis del petróleo de los años 70 el desarrollo de los MMC estuvo parcialmente estancada debido a los recortes de presupuesto pero hacia la década de los 80 el interés en estos composites vuelve a resurgir. Se desarrollan los MMC de refuerzo discontinuo y esto tiene como consecuencia la expansión del uso de la tecnología a nuevos campos y la impulsión de la popularidad de los nuevos materiales.

Mientras que los MMC de refuerzo discontinuo producen una mejora de propiedades más modestas que los de refuerzo continuo, estos nuevos composites son más viables en el sentido de mejora de los costes y de procesamiento representando un área de oportunidad para las aplicaciones comerciales.

Durante los 80 se desarrolla una importante labor investigadora centrada en buscar un equilibrio entre riesgo, rentabilidad y eficiencia aceptable para el sector comercial. Al mismo tiempo se desarrollan grandes programas tecnológicos en EEUU y en otros países que buscan obtener las mejores cualidades técnicas con MMC de refuerzo continuo. También durante este periodo la comunidad académica realiza una fuerte investigación en este tipo de composites, tanto de refuerzo continuo como discontinuo. Como resultado de estas actividades se establecen nuevas aplicaciones durante las siguientes dos décadas. En este tiempo se consigue superar difíciles problemas técnicos de incompatibilidad entre la matriz y el refuerzo, se desarrollan técnicas de procesamiento primarias y secundarias más económicas capaces de controlar adecuadamente la distribución de refuerzo y controlar la propiedades de las interfases.

Los MMCs hoy en día son una tecnología de obtención de materiales establecida no obstante en una industria dinámica que puede continuar creciendo o contraerse impulsada por otras tecnologías competidoras.

Se han concebido y estudiado un enorme abanico de composites con matriz metálica. Esta gran diversidad proviene de la ilimitada cantidad de combinaciones de matrices metálicas, refuerzos, tamaños de refuerzo, morfologías y distribuciones. No obstante el rango de materiales con aplicaciones comerciales es menor. Prácticamente todos los MMC de uso comercial poseen refuerzo discontinuo aunque existen algunas aplicaciones con refuerzo continuo de fibras de grafito sílica aluminio 203.

2.4.2. NiCrBSi-WC composites

El par NiCrBSi – WC forma lo que se conoce como composite de matriz metálica con refuerzo discontinuo perteneciente al grupo de los cermets. Los carburos cementados y cermets han sido usados durante más de 80 años en la industria de herramientas de corte. Estos composites de matriz metálicas a menudo exceden el

90 % de composición en volumen y son producidos mediante técnicas de pulvimetalurgia. Estos materiales están generalmente formados por una fase muy dura y relativamente frágil, normalmente un carburo rodeado por un aglomerante metálico que aporta tenacidad al material. En el caso del par NiCrBSi-WC este último actúa como fase dura, el uso de este composite está muy extendido y se ha venido utilizando desde principios del siglo XX. Su aplicación está dirigida principalmente a la realización de recubrimientos de endurecimiento superficial. La matriz de NiCrBSi tiene muy bajo punto de fusión, permitiendo la realización de recubrimientos con bajas densidades de energía, mediante proyección con llama, además de una muy buena mojabilidad por sus propiedades autofundentes. La aleación, en si misma, tiene buenas propiedades de dureza y resistencia a la corrosión mientras que con la adición del WC sus propiedades frente al desgaste mejoran notablemente. Uno de los puntos débiles de estos recubrimientos es su porosidad y falta de anclaje con el sustrato debido a la falta de energía disponible en los procesos de recubrimientos habituales. En consecuencia la investigación en el desarrollo de los procesos de recubrimiento con láser de este composite son interesantes. Diversos estudios se han centrado en este tema y han obtenido resultados satisfactorios demostrando que este material puede depositarse obteniendo un resultado denso y con una buena unión metálica con el sustrato.

NiCrBSi

La aleaciones NiCrBSi tienen una gran resistencia a la corrosión y un punto de fusión muy bajo. Una pequeña cantidad de Si incrementa la capacidad de mojabilidad en estado fundido haciéndola útil para aplicaciones de brazing para su uso en reparaciones y producción. La características más importante de este sistema cuaternario de NiCrBSi tienen que ver con sus propiedades a la hora de fundirse, de las cuales la reducción del punto de fusión por la adición de Silicio y Boro es la más importante. A este respecto la aleación funciona de manera similar al par Ni-B formando un eutéctico estable Ni-Ni₃B a con una reducción adicional del punto de fusión gracias al Silicio. No obstante el B y el Si reducen la plasticidad del material y sus porcentajes deben estar limitados. Técnicamente estas aleaciones consisten en

una matriz plástica de NiCr con volúmenes variables de partículas duras de boruros. Los boruros más comunes en las aleaciones comerciales son Ni_3B , CrB , Cr_5B_3 y Cr_2B actuando como fases duras. En este tipo de aleaciones incrementar la cantidad de Boro demasiado vuelve al material duro y frágil, sin embargo para unas cantidades de Boro razonables, en torno al 20 % at. y variando la cantidad de Cromo, los puntos de fusión se pueden ajustar entre los 1000 y los 1350 C. Si además tenemos en cuenta el efecto de la adición de Silicio es posible alcanzar temperaturas adecuadas para el brazing.

El ángulo de mojabilidad es especialmente importante sobre todo en aplicaciones de recubrimiento. Para un substrato de acero inoxidable 316 se ha comprobado que altos contenidos de cromo, entre el 10 y el 20 % at. y variando la cantidad de Boro, el ángulo de mojado siempre se mantiene por debajo del 10 %. Con respecto al contenido de Silicio se puede decir que la presencia de una cantidad pequeña permite observar una mejora de las propiedades de mojabilidad. Las aleaciones con bajo contenido en Cromo alrededor del 5 % at. muestran peores propiedades de mojabilidad que el resto. En su utilización en aplicaciones de brazing como metal de unión o de recubrimiento de endurecimiento superficial, las bajas temperaturas de fusión necesarias para el brazing requieren de valores de Si y B que perjudican las propiedades mecánicas. Por lo tanto se tiene que las aplicaciones de recubrimiento y brazing deben tener composiciones distintas. Finalmente estas aleaciones con una mayor cantidad de fases duras tendrán como fases presentes CrB , Cr_5B_3 , Cr_2B a medida que se reduzca el Ni y finalmente se formara Ni_3Si con cantidades más elevadas de Cr, B y Si.

El uso de aleaciones NiCrBSi para el tratamiento superficial contra el desgaste está en incremento. Se han encontrado varias aplicaciones en la industria, especialmente en la producción de acero vidrio, cerámica cemento y plásticos. En Europa más de la mitad del polvo metálico de NiCrBSi (sobre 500t/año) es usado en la industria del vidrio para recubrir varias herramientas en la producción de botellas y otros objetos de vidrio. Esta información se puede encontrar ampliada en [32].

WC

Los carburos son compuestos de Carbono y otro elemento menos electronegativo. En el caso del Tungsteno se trata de un carburo metálico con un metal de transición. En estos casos la estructura no llega a ser intersticial sino más compleja y no muestra estequiometrías definidas. Estos carburos tienen una serie de propiedades muy útiles como alto punto de fusión, gran dureza, gran resistencia a la corrosión y capacidades de conductividad eléctrica similares a los metales. El carburo de Tungsteno es uno de los más utilizados, con un mercado mundial para este material de 20 millones de kilogramos al año. Tiene las ventajas de un alto punto de fusión en torno a los 2600 - 2850 °C y gran dureza combinado con una gran resistencia a la fractura.

A principios del siglo XX, el WC atrajo la atención de la industria de fabricación de lámparas incandescentes, no solo por su alto punto de fusión sino también por su alta dureza y resistencia al desgaste lo que en su momento prometía ser un satisfactorio sustituto para los caros mandriles de diamante usados para el trefilado de los filamentos de tungsteno. Hoy en día el WC tiene muchas aplicaciones en tecnologías esenciales desde la industria mecánica hasta la química. Es usado como un carburo cementado en herramientas de corte, herramientas de minería, puntas de hojas de sierras, herramientas de mecanizado, herramientas para maquinaria, taladros, partes de desgaste, troqueles, válvulas de ruedas para automoción, toberas para aplicaciones de arenado y proyectiles antiblindaje. Su solubilidad en otros metales de transición y sistemas metal-carburo se usa en la producción de materiales, en combinación con carburos tales como TiC y TaC. Su alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmico es adecuado para la fabricación de crisoles para hornos y otros componentes. El carburo de Tungsteno también está apareciendo en nuevas aplicaciones como sustituto para metales nobles como Pt, Pd y Ir en la industria de catalizadores o como electrodo catalítico para la oxidación anódica del hidrógeno en células de combustible. Otra aplicación importante es su utilización como componente en recubrimientos antidesgaste en la industria aeroespacial. Esta información puede encontrarse ampliada en [34].

Capítulo 3

Metodología

Cuando se utiliza una técnica de deposición por haz, como el Laser Cladding, con polvo como material de aporte, es posible adaptar la instalación para la fabricación de gradientes funcionales con solo incluir una unidad de mezclado en el sistema de alimentación.

En este tipo de proceso es posible obtener, en el material depositado, una composición cercana a la del material que se está aportando, y un FGM puede obtenerse si se cambian las proporciones de los diferentes componentes en polvo aportado mediante la unidad de mezclado de polvo.

El objetivo final es depositar un material que posea un cambio gradual de composición en cualquier dirección deseada y para ello, dado un cierto plan de trayectorias y un mapa de concentración relativa asociado de una mezcla o fase de refuerzo, tiene que establecerse si es o no posible alcanzar el gradiente especificado; es decir que cambios de concentración máximos son posibles dado una serie de dispositivos, actuadores, materiales, etc. y como modificar los parámetros del proceso para alcanzar estos cambios de composición.

Durante el proceso existen dos formas de producir una variación de composición, ambas basadas en diferentes principios y que requieren operar el sistema de diferente manera(ver figura 3).

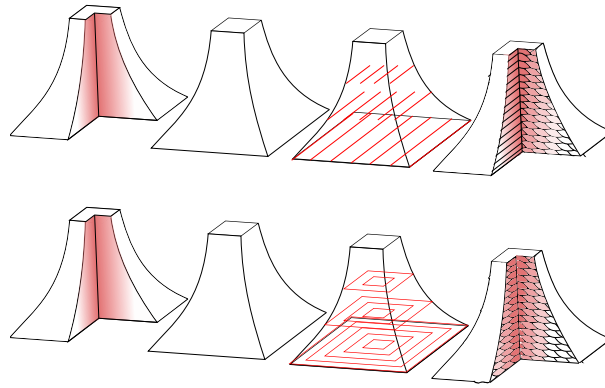


Figura 3.1: Diagrama con el efecto sobre la estructura del material al depositar un gradiente con diferentes métodos

3.1. Generación de gradientes mediante deposición de volúmenes de composición homogénea

La generación de gradientes mediante la deposición de volúmenes de composición homogénea, consiste en dividir el proceso de deposición del material en distintos pasos, en cada paso el proceso de deposición se realiza con una mezcla distinta. El objetivo es depositar, en cada etapa, el material nuevo sobre el material ya depositado en la etapa anterior generando una unión metalúrgica entre ambos materiales.

La diferencia de composición genera, a través de la superficie de unión, un gradiente entre las composiciones nominales escogidas para cada paso [29]. Además hay que tener en cuenta otros fenómenos relacionados con la refusión del sustrato. Existen dos importantes tipos de escenario, la formación de uniones metálicas entre aleaciones disímiles a lo largo del volumen de refusión, o la formación de una unión metálica con dispersión y difusión de una fase de refuerzo. Se debe entender que es posible que ambos procesos pueden ocurrir al mismo tiempo, por ejemplo, si el material de la matriz se cambia junto a la inclusión de una fase de refuerzo.

3.1.1. Uniones metálicas

Como en cualquier unión soldada entre dos aleaciones metálicas diferentes aparece una zona de dilución en la que se mezclan elementos de ambos metales.

En este volumen se produce una transición entre las composiciones de los materiales depositados en distintas etapas, y se forma un gradiente perpendicular a la dirección de deposición.

La dificultad de obtener un método que produzca resultados satisfactorios reside en conseguir las dimensiones y la tasa de cambio adecuada a lo largo de la zona de dilución. Las variables que pueden ser ajustadas mediante los parámetros controlables del proceso y que afectan a la tasa de cambio son:

Porcentaje de dilución

La dilución es una de las características de las capas realizadas mediante recubrimiento o LMD. Tiene dos posibles definiciones una metalúrgica y otra geométrica; De acuerdo a la definición geométrica la dilución podría describirse como la relación en porcentaje del cociente entre el área total del recubrimiento medida sobre una sección plana, correspondiente a material depositado que se encuentra sobre la línea del sustrato (el corte de la superficie del sustrato con el plano de la sección) más el área correspondiente al material del sustrato refundido sobre dicha sección con respecto a esta segunda. Análogamente puede definirse de manera metalúrgica como la relación entre la masa de sustrato fundido con respecto a la masa total fundida del recubrimiento.

Distancia de solape

Fracción de la anchura del cordón cubierta por la deposición posterior de un cordón paralelo. También puede referirse al ancho del spot menos desplazamiento lateral de la herramienta entre dos cordones anexos.

Ancho del cordón

Distancia máxima entre las partes del cordón depositado medida en un plano perpendicular a la dirección de avance.

Tasa de deposición

Cantidad de material depositado sobre el sustrato por el proceso, normalmente expresada en masa por distancia. Hace referencia al peso de material nuevo que queda adherido al sustrato tras la deposición

Potencia Láser

Energía por unidad de tiempo suministrada por el haz láser.

Composición de la mezcla

La relación en peso de las partículas de los distintos componente utilizados como material de aporte durante la deposición. La diferencia entre la composición de material de aporte y el sustrato determinará lo abrupto del gradiente.

Velocidad de solidificación

La velocidad de solidificación hace referencia al tiempo que tarda el baño fundido en solidificarse y tiene un impacto directo sobre la microestructura. Puede afectar a la composición final de la matriz y al gradiente de composición observado en la interfase [35].

Además es necesario considerar que el proceso de solidificación de la zona de dilución donde están presentes elementos de ambas composiciones límite, puede dar lugar a la aparición de nuevas fases y otros constituyentes en el material de la unión. Estos cambios pueden dar lugar a propiedades no siempre deseables. Está asumido que la variación de las propiedades es interesante cuando se diseña un FGM, pero el proceso de solidificación puede conllevar sin embargo la aparición de fases perjudiciales que conduzcan a propiedades no deseadas y que incluso lleguen a provocar el fallo del material. Este es un fenómeno extensivamente estudiado en procesos de recubrimiento que utilizan materiales disimiles para el sustrato y el aporte así como en procesos de soldadura. En estos procesos es posible tener sistemas de aleaciones complejos de múltiples componentes. La diferencia entre la composición del sustrato y el material de aporte provocará en la zona de dilución una composición

intermedia entre ambos, que dependerá del grado de refusión del material del sustrato. Un valor no adecuado del volumen de dilución puede alterar la composición del baño fundido hasta un punto desaconsejable donde se puede obtener una composición final no apta para los requerimientos de la tasa de cambio del gradiente. En la generación de FGM propiamente dicho, por lo general, el problema se minimiza parcialmente al escogerse normalmente mezclar en distintas proporciones dos componentes de los cuales es conocido que pueden coexistir en las relaciones de concentración buscadas e intermedias y poseen buena compatibilidad.

3.1.2. Uniones con fase de refuerzo

Cuando el gradiente se genera mediante la adición de una fase de refuerzo, no se produce el cambio de composición de la misma manera que en las uniones metálicas. En la interfase normalmente solo se produce la refusión de la matriz mientras que la fase de refuerzo tiene un grado de dispersión diferente a ambos lados. El cambio en el gradiente se producirá por el cambio observable de la dispersión de la fase de refuerzo en la matriz o sus características morfológicas. La manera en la que se comporta la fase de refuerzo dependerá de su naturaleza siendo difícil la generalización debido a la gran variabilidad de estos refuerzos.

En los composites de matriz metálica el cambio de composición se produce por lo general por una mayor o menor dispersión de la fase de refuerzo en la matriz. La problemática se deriva, entonces, en evitar que con el nuevo proceso de deposición no se diluya o difunda la fase de refuerzo hacia la matriz, ya que de ocurrir puede producirse una pérdida de las propiedades del material, o la pérdida de la distribución volumétrica en la fase de refuerzo buscada, lo que afecta a la tasa de cambio de concentración. Otros problemas son la dispersión no homogénea de la fase de refuerzo, lo que generará concentraciones locales de la fase de refuerzo diferentes a las buscadas. La formación de discontinuidades debido a unos parámetros inadecuados del proceso, ya que estos afectarán a la fase de refuerzo y la matriz de manera distinta y esto puede complicar la deposición de ciertos valores de concentración.

Otra de las diferencias con respecto a las uniones metálicas es que, en los gradientes con fase de refuerzo no resulta inmediato definir el cambio de concentración. La

relación de composición entre ambas fases tiene que establecerse para un volumen del material en cuyo caso una medición del cambio de composición debe extrapolarse de la distribución de las fases y no puede medirse directamente. Un segundo aspecto del mismo problema es que una vez definidas las propiedades de la estructura que determinan el gradiente la medición de estas no puede medirse punto a punto, y requiere del uso de valores promedios, lo que dificulta establecer la continuidad en el cambio de propiedades. Generalmente se utiliza la medición de alguna estadística del mapa surgido de la inspección visual de la microestructura para determinar la gradación.

Volviendo al caso general, las dificultades que restan por mencionar son comunes al proceso de deposición de cualquier recubrimiento con láser, la aparición de discontinuidades, falta o exceso de dilución, oxidación de la superficie, falta de eficiencia, falta de material debido al solape, ángulo de mojado del cordón inadecuado y la formación de fases no deseadas debido a un enfriamiento demasiado rápido.

3.1.3. Teselado, efectos de la generación de trayectorias

Los detalles de la técnica relacionados con la deposición del gradiente no abarcan todos los aspectos a resolver en este método de fabricación de FGM. Las superficies de solape entre cordones determinan la dirección del cambio composición que es observable en cada punto del volumen y a su vez estas vienen definidas por el patrón de relleno del volumen a fabricar; así la planificación de las trayectorias está ligada al mapa de composición que se desea para la pieza [29]. A su vez, dado que la curvatura que pueden adquirir las superficies de composición homogénea están limitadas por las capacidades del posicionador de la instalación y el ancho del spot, las trayectorias planificadas están condicionadas por la instalación. Convirtiendo el proceso de discretización del gradiente en una tarea compleja. Además otro punto notable es que estas superficies no están alineadas entre si y producen un teselado del material irregular y anisótropo, que puede interrumpir el cambio de composición en una dirección determinada, ver apartado 3.2. Como se ha demostrado en trabajos previos [29] el algoritmo de planificación de caminos ha de tener todas estas condiciones en cuenta para evaluar si es posible crear una pieza con el mapa de composición

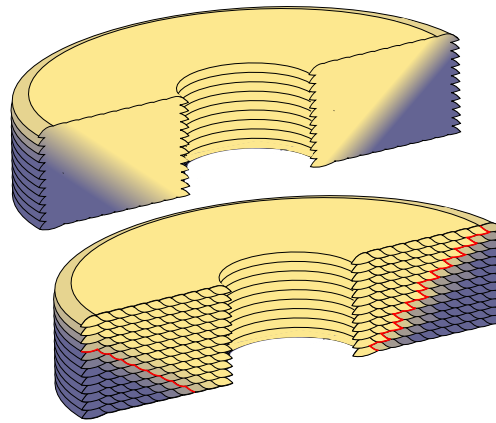


Figura 3.2: Diagrama del teselado de un sólido fabricado por deposición láser

deseado. También se ha observado que, la refusión del sustrato en algunos pares de materiales produce una transición de la composición lo suficientemente suave para minimizar los problemas que pudieran surgir del contacto entre zonas con grandes saltos en la proporción de algún componente reduciendo la dificultad de implementar la discretización y la planificación de trayectorias.

Para la realización de gradientes con saltos discretos de composición es necesario realizar una serie de tareas, principalmente el estudio paramétrico de las características del cordón centrándose principalmente en conseguir un ancho de haz compatible con la resolución del gradiente buscado, una dilución aceptable para las tasa de cambio de composición buscadas y una relación de aspecto que permita el solape y la superposición de cordones. Para sistemas de varios materiales es, además, necesario introducir la composición como uno de los parámetros sobre los que determinar el espacio muestral. En algunos casos es suficiente con estudiar los valores extremos de las composiciones que se pretende alcanzar. En otros casos más complejos, sobre todo en situaciones donde los materiales tengan comportamientos complicados, no solo será necesario esto sino que también resultará importante realizar una prueba de solape entre los cordones de distinta composición.

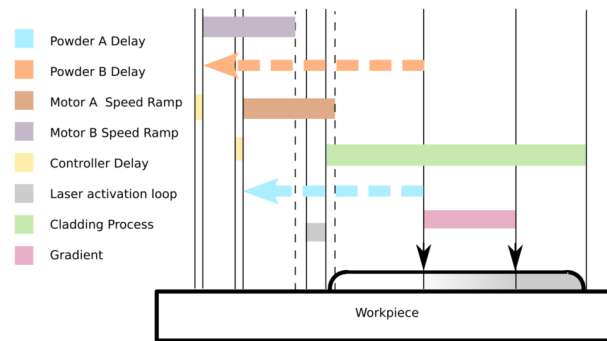


Figura 3.3: Diagrama de la deposición de un cordón de composición heterogénea con LMD

3.2. Generación de gradientes mediante deposición de volúmenes de composición heterogénea

La obtención de un volumen de composición heterogénea requiere la generación de un cambio de composición durante la deposición del cordón, de manera que no se forme una frontera entre las dos composiciones límite del gradiente [28].

En este caso todo el material se solidifica de manera continua y el cambio de composición se observa a lo largo del nuevo volumen generado en la dirección de avance del posicionador(figura 3.3).

Si se desea una variación continua de la composición de este tipo, la mezcla de polvo que se proyecta sobre el baño fundido debe de ser cambiada durante el movimiento del sistema de proyección de polvo, de manera que a medida que este se desplaza, el material aportado sobre el baño fundido lleve una relación diferente de partículas de cada uno de los componentes que se encuentra almacenado en las tolvas del sistema.

Como ya se ha mencionado una de las bondades de este proceso es que el material depositado presenta una composición similar a la de la mezcla de las partículas proyectadas, por lo tanto el control del cambio de composición se traduce en el control del sistema de alimentación de polvo utilizado en el sistema LMD.

3.2.1. Control del alimentador de polvo

El control del alimentador de polvo durante un proceso de deposición de un volumen de composición heterogénea conlleva la capacidad de cambiar la composición de la mezcla de polvo de acuerdo con la tasa de cambio deseada en el material final y la sincronización del cambio de composición con el sistema posicionador de la instalación LMD.

La regulación precisa de la tasa de flujo másico de polvo en el proceso de deposición con láser es un problema en sí mismo que afecta a todos los procesos de láser de este tipo ya sea recubrimientos o fabricación aditiva y que tiene un efecto sustancial en la calidad del resultado final. Por si no fuera suficiente, obtener un cambio controlado de la tasa de flujo másico es más complejo. En un principio el tipo de actuación necesario para conseguir estos objetivos depende directamente del tipo de dispositivo utilizado para enviar el polvo. Los sistemas más comúnmente utilizados son:

Sistemas de Alimentación de polvo por gravedad

Estos alimentadores utilizan un orificio en la parte inferior del contenedor de polvo de manera que este es propulsado fuera del contenedor por la propia fuerza de la gravedad. Es necesario un sistema mecánico adicional para controlar el flujo. Normalmente esto consiste en una rueda o disco con huecos para contener el polvo que redistribuye el material en función de su velocidad de giro. Este tipo de alimentadores no está aconsejado para flujos de masa pequeños.

Sistemas de Alimentación de polvo mediante ruedas mecánicas (disco métrico)

Esta clase de alimentadores puede mostrar una gran variedad de diseños constructivos, como norma utiliza un disco o un tornillo con diversas partes móviles para desplazar el material en polvo desde el contenedor hasta el sistema. Esto provoca que el alimentador sea susceptible al desgaste mecánico con la necesidad de sustituir piezas y un mayor coste de mantenimiento. Estos alimentadores permiten el uso de polvos con una gran variedad de tamaño de partícula.

Sistemas de Alimentación de polvo de lecho fluidizado

Este tipo de alimentadores trabajan aprovechando principios de comportamiento de los fluidos y no presentan necesidad de utilizar partes móviles para transportar el polvo. Estos sistemas proveen de un flujo continuo y no pulsado que permite un buen control sobre el flujo másico. También se benefician de un bajo coste de mantenimiento. Estos sistemas trabajan con una cantidad prefijada de gas enviada a la tolva de almacenamiento de la unidad produciendo el fluidizado del polvo. El medio fluidizado es transferido a través de un tubo de recolección hasta el manguito del cabezal donde será propulsado por el gas de transporte.

Sistemas de Alimentación de polvo por vibración

Este sistema utiliza una bandeja plana con algún tipo de inclinación donde el polvo es depositado a través de una abertura en la tolva. Un actuador externo hace vibrar la bandeja mandando el polvo hacia el extremo de la misma por donde finalmente llega al sistema neumático que lo lleva hasta su destino. El flujo puede controlarse controlando las oscilaciones de la bandeja.

Además de los tipos de alimentadores explicados en este apartado, no es extraño encontrar algunos dispositivos que combinen las características de más de un sistema para obtener una mejora de los resultado. Esta y otra información acerca de los alimentadores de polvo se puede encontrar en [16]. En segundo lugar, una vez conocido el funcionamiento del alimentador de polvo es necesario determinar que acciones deben realizar los actuadores de este para producir cambios en la tasa de flujo másico con suficiente rango dinámico. En tercer lugar se debe implementar un controlador capaz de dar órdenes a los actuadores y como cada componente de la mezcla de polvo requiere una tasa de flujo másico diferente es necesario un controlador por cada componente y la capacidad de poder sincronizar estos controladores entre si. En cuarto y último lugar hay que ajustar y calibrar los controladores para obtener con precisión el flujo másico y las tasa de cambio deseados.

El proceso de sincronizar el funcionamiento de los controladores del alimentador con el sistema de posicionamiento de la instalación normalmente consta de dos partes; la primera parte conlleva introducir en el programa del posicionador órde-

nes de salida que envíen a través de cualquiera de los buses externos del mismo la información necesaria para, como mínimo, activar los cambios de composición. Dependiendo de las posibilidades de comunicación del controlador del posicionador es posible comunicar también las tasas de cambio y las relaciones deseadas de componentes durante el proceso así como otra información relevante. La segunda parte es determinar el momento en que las órdenes deben ser ejecutadas. Para esto se debe establecer una referencia temporal desde algún punto de la ejecución del programa del posicionador, puede ser un valor en las señales del encoder del posicionador, el punto de ejecución de una instrucción o el propio inicio de programa, a partir del cual determinar los tiempos de retraso que hay que aplicar al alimentador o al posicionador para que la llegada al baño fundido de las partículas de polvo con una composición determinada coincida en la posición correcta del espacio de trabajo. El valor del retraso en cada caso tiene en cuenta múltiples factores de los que el más relevante es siempre el tiempo en que las partículas tardan en desplazarse desde la tolva de almacenamiento hasta el baño fundido.

3.2.2. Parámetros de la deposición

Como en cualquier otro caso de deposición de materiales por láser, los parámetros usuales del proceso tienen que determinarse para un correcto resultado, potencia, velocidad de avance, cantidad de material aportado y ancho del spot.

En el caso de este tipo de deposición las condiciones del sustrato y las del material aportado no van a permanecer constantes durante todo el proceso de deposición dado que el material cambia de composición y, por lo tanto, lo hace el sustrato cuando se trabaja sobre el material previamente depositado de esta manera. Esto puede producir las mismas dificultades que se comentan en el apartado de uniones metálicas en el caso anterior, con un giro más complicado al darse la posibilidad de encontrar un sustrato de composición heterogénea.

Otro importante aspecto a tener en cuenta es que la deposición de un gradiente puede realizarse de varios modos: manteniendo la masa constante, manteniendo el volumen constante, o con variación de masa y volumen.

Masa constante

Cuando se altera la composición del material base de la aleación o se añade una fase de refuerzo de naturaleza muy diferente a la de la matriz, es necesario controlar que la tasa de deposición no se vea alterada. Todo incremento en masa de un componente del material se debe acompañar de la correspondiente reducción en el resto, de manera que la tasa de deposición total, masa por unidad de tiempo, no se vea alterada. Esto debe realizarse al mismo tiempo que se controla la composición lo que conlleva situaciones difíciles debido a que los distintos componentes del material no siempre pueden cambiarse de manera independiente.

Volumen constante

El problema es similar al caso anterior, cuando se altera la composición del material para generar el gradiente se altera la densidad del mismo, llevando a un cambio en el volumen. La falta o exceso de volumen puede ser un problema realmente serio para la fabricación aditiva, dado que la diferencia en la morfología del cordón puede llevar directamente al fallo del proceso de deposición tras la fabricación de las primeras capas, se pueden producir ondulaciones en las capas, o cambio de la altura de capa, que tienen consecuencias como son el sobrecalentamiento del material o la pérdida de eficiencia. El control del volumen se debe realizar teniendo en cuenta una tasa de volumen depositado y no la masa depositada. Esto puede acarrear una mayor demanda de los actuadores, produciendo límites a la tasa de cambio de composición más estricta que si no fuera necesario en control del volumen.

Cambio con variación de masa y volumen

Este es el caso más sencillo en el que el incremento en la cantidad de polvo de únicamente uno de los componentes genera el cambio de composición. Una variación del 100 % no es posible de esta manera ya que el segundo componente nunca llega al 0 %, pero normalmente tampoco es necesario dado que la composición límite buscada es inferior. La tasa de deposición no es constante y el volumen no se tiene en cuenta. Aunque es una manera de generar gradientes perfectamente válida, no es recomendable en procesos de fabricación aditiva con FGM.

3.2.3. Generación de gradientes de concentración a partir de dos componentes

Para realizar un gradiente, la mejor manera es utilizar los dos principios de deposición de manera conjunta y establecer una única estrategia para la planificación de trayectorias. En este paradigma, la generación de las trayectorias del posicionador se realiza usando solo una dirección de escaneo por capa determinada por la función de cambio de composición.

De esta manera en la dirección de escaneo el gradiente se genera de manera continua, mientras que en las direcciones transversales a esta, el gradiente aparece en la zona refundida a través de la superficie de solape.

Para la aproximación de una función de cambio de composición determinada en el espacio, simplemente hay que minimizar las diferencias entre el mapa de composición dado y el mapa resultante del proceso, condicionado por la planificación de trayectorias. Para este proceso de minimización se pueden utilizar diversas variables como la orientación de la geometría con respecto a la dirección de deposición del material. Aunque en la dirección perpendicular a capa el gradiente continuo vendrá siempre paralelo al substrato de la pieza y tan solo podría optimizarse eligiendo la cara de la geometría final que se pone en contacto con la base; decisión que usualmente viene determinada por las restricciones de la técnica de fabricación y no puede ser elegida libremente. Este procedimiento a la hora de discretizar el mapa de composición en líneas y en diferentes operaciones del alimentador, requiere de una serie de datos para poder realizarse correctamente, entre ellos están la tasa máxima de cambio de composición, las dimensiones del cordón, la posibilidad de superposición del material entre distintas composiciones, la concentración máxima posible de un componente en el material, etc. En este trabajo se propone una medida para expresar los efectos de las características de la instalación sobre el proceso de discretización de un gradiente dado y este corresponde al círculo más pequeño que es posible depositar de un material sobre otro. En el caso de un composite con dos componentes, la medida será igual para los dos materiales en caso de más de dos componentes deberá computarse por separado para cada material. Es relevante mencionar que a menudo

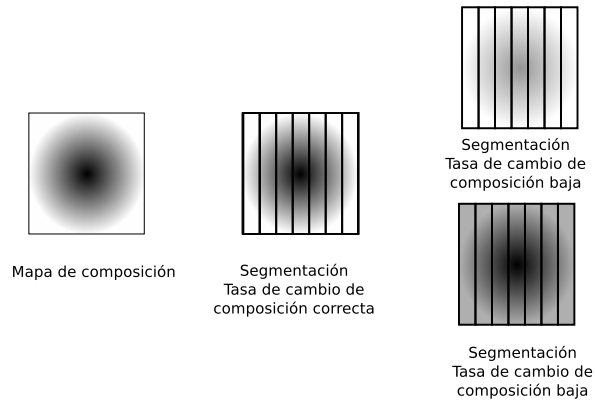


Figura 3.4: Diagrama con la discretización de la función de distribución de composición para un punto dado ciertos parámetros de deposición

este círculo menor vendrá determinado simplemente por el valor más restrictivo del sistema con lo que su cómputo se vuelve relativamente sencillo, una vez todas las características del proceso de deposición se han determinado. Un ejemplo del efecto de este valor puede observarse en la figura 3.4

3.2.4. Control de la mezcla de polvo proyectada; metodología para determinar la tasa de cambio de composición

De lo que se ha mencionado en apartados anteriores se deduce que la regulación precisa del flujo másico y el control de la composición de la mezcla de partículas proyectadas, es uno de los aspecto más problemáticos para conseguir un cambio continuo en la composición del material.

De manera reiterada, uno de los principales escollos a la hora de fabricar gradientes de composición es la incapacidad de los actuadores para modificar el flujo de masa de cada componente de la mezcla con la suficiente rapidez. Lo que conlleva la pérdida de resolución con la que una determinada función de composición puede ser plasmada en el material depositado. Dado un cierto plan de trayectorias para reproducir un campo de composición de dos componentes, es fácil de mostrar que el punto más pequeño que puede obtenerse en una capa de material depende directamente de la capacidad de los actuadores para modificar el flujo de polvo (ver figura 3.5). Parece lógico concluir que dada una tasa máxima de cambio de flujo másico

para cada uno de los actuadores encargados del transporte de cada componente en polvo y unos parámetros de fabricación, existe una tasa de cambio de composición máxima de la que dependerá la precisión con la que un mapa de composición determinado puede ser fabricado con dichos actuadores. Esta tasa de cambio másico, sirve para caracterizar el sistema de fabricación de gradientes y puede ser definida como la tasa porcentual de cambio de composición por unidad de longitud.

Esta tasa de cambio así definida, como se ha mencionado, depende del plan de trayectorias que a su vez depende de los parámetros del proceso. Para cada valor de velocidad de escaneo existirá una razón distinta de cambio de composición así como para diferentes tasas de deposición. Fijados los parámetros de velocidad y masa a los que se puede realizar el proceso, la tasa de cambio queda definida. Esto tiene importantes consecuencias cuando se incorporan las restricciones de fabricación a volumen constante o masa constante ya mencionadas. En ese caso se componen la relación entre la velocidad y la masa necesarias para depositar cada composición puntual en la relación de tasa de cambio dando lugar a complejas funciones de tasa de cambio con la velocidad.

Para demostrar y plasmar adecuadamente lo expuesto en este punto supongamos la existencia de un sistema LMD capaz de proporcionar un flujo controlado de dos componentes, dos materiales en polvo A, B y que permita la modificación del flujo másico con una tasa de cambio máxima por ejemplo m_A , m_B , medida en masa por unidad de tiempo al cuadrado. En este caso el tiempo necesario para pasar de un valor de flujo másico a otro vendrá dado por la expresión.

$$t_A = \frac{\Delta\rho_A}{m_A}$$

donde $\Delta\rho_A$ representa el incremento del flujo másico de material A en unidades de masa por unidad de tiempo. Sin embargo dependiendo de la velocidad de avance del posicionador v_L la tasa de cambio de composición sera distinta, la longitud del gradiente L siempre ha de ser menor que el espacio recorrido durante el tiempo que el actuador cambia de composición de lo que se obtiene:

$$t_A = \frac{\Delta\rho_A}{m_A} \leq \frac{L}{v_L} \Rightarrow \frac{\Delta\rho_A}{L} \leq \frac{m_A \cdot t_A}{v_L}$$

Es conveniente expresar el resultado en términos porcentuales dado que la composición se define como la fracción en masa entre dos componentes o elementos de un material. Luego tenemos que dado $\rho = \rho_A + \rho_B$ podemos definir la fracción en peso como $\omega_A = \rho_A/\rho$ y en consecuencia la expresión anterior queda:

$$\frac{\Delta\omega_A}{L} \leq \frac{m_A \cdot t_A}{v_L \cdot \rho}$$

A partir de este punto podemos computar la relación real de cambio de composición y para eso es importante tener en cuenta que los materiales deben depositarse con una tasa de masa constante o volumen constante para poder realizar debidamente el proceso de fabricación, sustituyendo la tasa de deposición por unidad de longitud $f = \rho/v_L$ en la ecuación.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\Delta\omega_A}{L} \leq \frac{m_A \cdot t_A}{v_L \cdot \rho} \\ f = \rho/v_L \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta\omega_A}{L} \leq \frac{m_A \cdot t_A}{v_L \cdot f \cdot v_L} \Leftrightarrow \frac{\Delta\omega_A}{L} \leq \frac{m_A \cdot t_A}{v_L^2 \cdot f} \quad (3.2.1)$$

En consecuencia la tasa de cambio varia según el cuadrado de la inversa de la velocidad, lo que lleva a una relación asintótica que tiene un importante impacto en la selección de parámetros para fabricación de materiales con gradiente funcional utilizando LMD (ver figura 3.5) y compone uno de los resultados importantes de esta tesis.

Este resultado dice que el incremento lineal de la tasa de productividad en la fabricación de un gradiente (el número de piezas que se pueden realizar en un tiempo dado) se traduce en un incremento al cuadrado de la capacidad de cambio de flujo másico de los actuadores del alimentador de polvo.

A la inversa tenemos que dado un sistema de alimentación de polvo con unas limitaciones dadas es virtualmente posible alcanzar una tasa de cambio determinada únicamente reduciendo la velocidad a la que se realiza el proceso. Lo que resuelve el problema de adaptar las instalaciones existentes para la fabricación experimental de gradientes funcionales a pesar de que los alimentadores no sean demasiado precisos.

Es necesario destacar dos cosas: La magnitud $\Delta\omega_A$ tiene unidades de porcentaje de A por distancia y es susceptible de crear confusión cuando no se le aplican unidades métricas concretas como ejemplo una tasa de un 20 % por milímetro corresponde a una tasa de 200 % por centímetro lo que puede resultar alarmante; la tasa

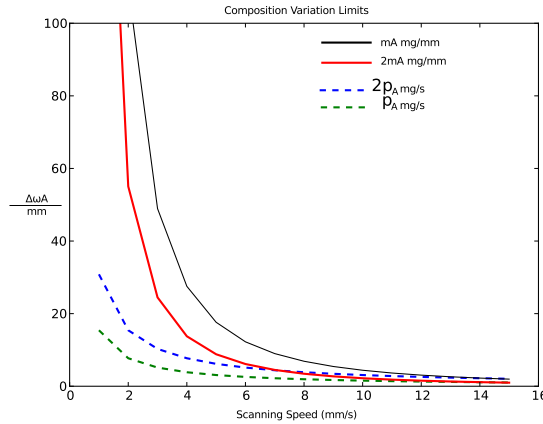


Figura 3.5: Gráfica de la tasa de cambio de composición con respecto a la velocidad

de cambio es un valor instantáneo y puede presentar valores por encima del 100 %. En la figura 3.5, donde se comparan las tasa de cambio para masa constante con la tasa de cambio simplemente incrementando el flujo, resulta evidente el efecto del cuadrado de la velocidad a la hora de determinar la tasa de cambio de composición. Finalmente decir que para volumen constante el desarrollo es análogo solo que se debe sustituir el flujo másico por volumen aportado.

3.3. Sincronización del controlador de polvo con el sistema de posicionamiento: Determinación del retraso de polvo

Pueden emplearse distintos métodos para determinar los retrasos que permiten sincronizar los controladores del posicionador y del flujo de polvo. En la literatura [36] [29] [28] se utiliza principalmente la realización de mapas químicos sobre muestras obtenidas mediante el uso de ensayos destructivos en el material. Con ello se intenta determinar el grado de cambio de composición y la posición del gradiente con respecto a la posición de inicio del cordón y la posición de inicio del cordón se relaciona a su vez con las órdenes del controlador, lo que asumiendo que el posicionador se desplaza a velocidad constante determina el retraso a aplicar entre ambos controladores. En esta tesis se proponen otros dos sistemas:

3.3.1. Monitorización de la emisión óptica del baño fundido

Cuando los materiales son calentados aparece una emisión de radiación electromagnética con espectro similar al del cuerpo negro. El baño fundido generado por un proceso de deposición láser alcanza normalmente altas temperaturas y emite una intensidad de luz proporcional con el tamaño del baño fundido y la temperatura. Esta señal puede detectarse con cualquier sensor óptico, como por ejemplo un fotodiodo. El cambio de composición en el baño fundido producido por la generación de un gradiente, afecta a las propiedades ópticas del material pues están determinadas principalmente por la composición, con lo que existe la posibilidad de que se modifique la absorptividad que el material presenta a la luz láser utilizada en el proceso. Como consecuencia pese, a que todas los parámetros de deposición permanecen constantes la cantidad de energía en el baño fundido se verá afectada. Si este cambio de energía es lo suficientemente grande se puede observar en un sensor óptico de manera que se puede determinar en que momento aparece el cambio de composición en el material y utilizar la información para sincronizar el controlador del alimentador y el posicionador de la instalación.

3.3.2. Medición del tiempo de retraso del polvo mediante sistemas de análisis de imagen

En este segundo sistema la sincronización se realiza sin necesidad de que intervenga la realización del proceso de deposición en ninguna de sus formas. La metodología consiste en monitorizar la respuesta de los actuadores del alimentador de polvo, al mismo tiempo que se graba el vídeo del flujo de polvo mediante una cámara situada frente a la boquilla del sistema láser, de manera que se pueda situar en el tiempo cada fotograma adquirido con respecto a la señal del actuador. La boquilla se ilumina con algún tipo de fuente de luz y se hace funcionar el alimentador. Cuando el haz de polvo se forma en la boquilla este se observa en la cámara y el área total iluminada se puede computar como una señal. Esta por si misma no tiene ningún valor cuantitativo pero su variación en el tiempo con respecto a la señal del controlador sí lo tiene. Para obtener el retraso del polvo, al actuador se le ordena realizar

un pulso. Este pulso es recogido en un ordenador cuando produce un efecto en la respuesta del actuador y, un tiempo más tarde, genera una respuesta en la cantidad de polvo que pasa por la boquilla lo que es observado en la cámara como un pulso en el área aparente del haz de polvo. El retraso entre los pulsos puede ser determinado comparando las dos señales. El uso de sistemas ópticos para determinar el retraso en el modelo dinámico de un alimentador observando la correlación con la señal del actuador no es innovador. [37] Se utiliza un fotodiodo calibrado para obtener el retraso del alimentador con una configuración no muy distinta a la utilizada aquí. No obstante este sistema tiene la particularidad de permitir su instalación permanente además de mayor rango dinámico y mejor señal ruido, y con cámaras modernas posiblemente mucha más frecuencia de muestreo.

Ambos sistemas proporcionan información precisa e inmediata sobre el retraso total del gradiente sin necesidad de utilizar ensayos destructivos. La información es obtenida con respecto a las órdenes proporcionadas por el posicionador y la respuesta del alimentador de polvo.

3.3.3. Ajuste del controlador de polvo: Respuesta dinámica del flujo másico

En la metodología propuestas se asume que se establece, para cambiar el flujo másico de cada uno de los materiales en polvo aplicados a la mezcla, una tasa constante de variación de flujo másico. Para esta se determina la incidencia en el cambio de composición producido en el material depositado dependiendo de los parámetros de velocidad del posicionador y tasa de aporte. Sin embargo es de esperar o se puede sospechar que los alimentadores de polvo no respondan correctamente cuando no están trabajando en estado estacionario. Para investigar estos efectos se realiza un detallado estudio para poder medir con precisión la respuesta dinámica del flujo del polvo que llega al baño fundido que se puede encontrar en el capítulo 6 de esta tesis.

3.4. Métodos de inspección y análisis

3.4.1. Estudio de dureza

La dureza del material depositado se estudia mediante ensayo de indentación Vickers. Los ensayos de dureza mediante indentación son utilizados para determinar la susceptibilidad del material a la deformación. El ensayo consiste en presionar el material con un diamante bajo una carga conocida hasta que se forma una impresión en el material. los resultados de estos ensayos se cuantifican mediante un método estandarizado para analizar la huella, que utiliza una escala numérica propia para presentar el resultado. El ensayo Vickers está indicado para la medición de dureza en metales. Es necesario que la superficie sea perpendicular a la dirección de la fuerza y la rugosidad sea menor que el diámetro del indentador. En el trabajo realizado el estudio de dureza se realiza sobre las piezas preparadas para la inspección metalográfica. Las indentaciones se realizan sobre la parte de la muestra correspondiente al material depositado, en una cara perpendicular a la superficie del sustrato, ya sea transversal o longitudinal a la dirección de la deposición. Se efectúan entre 5 y 10 indentaciones a intervalos regulares cubriendo la distancia entre la zona de dilución y la superficie del material depositado. El material analizado es, en todos los casos, una matriz de NiCrBSi y su mezcla con el material del sustrato. La medición de dureza proporciona información sobre la cantidad de WC disuelto, el nivel de dilución y la susceptibilidad para la fractura.

3.4.2. Inspección metalográfica de la calidad del recubrimiento

Las muestras depositadas mediante LMD son analizadas por un estudio metalográfico. Estas son cortadas, pulidas e inspeccionadas en el microscopio. Como la mayoría de las muestras consisten en capas de menos de dos centímetros, la inspección de un corte longitudinal es suficiente para determinar con precisión la presencia de discontinuidades. Para la caracterización de los cordones sencillos, la sección transversal se utiliza en su lugar. En la prueba se atiende especialmente al porcenta-

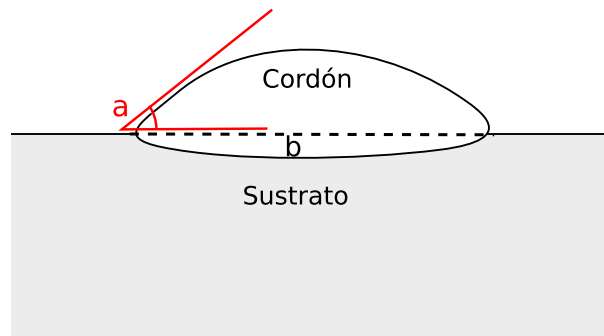


Figura 3.6: Diagrama sección del cordón depositado observada en las micrografías; a ángulo de solape, b zona de dilución

je volumétrico de dilución, la porosidad, la presencia de grietas, el ángulo de solape y la presencia de una zona afectada térmicamente.

La relación volumétrica de carburos respecto a la matriz también se estudia a partir de las metalografías mediante un análisis estereológico. Para este estudio es importante poder distinguir las distintas fases de interés en la metalografía. En este caso la preparación de las muestras es sencilla ya que no es necesario un tratamiento específico de estas para distinguir los carburos. Debido a la diferencia en dureza entre los carburos y la matriz, tras el pulido los contornos de estos sobresalen de la matriz produciendo suficiente contraste para permitir su observación. No obstante debido a la añadida complejidad que supone la presencia de los gradientes de concentración el estudio de la fracción volumétrica de carburo se explica más adelante en su propio apartado.

3.4.3. Medición de la dilución del la fase de refuerzo hacia la matriz

En el proceso de deposición del material la matriz de Níquel se mezcla con el refuerzo de carburo de Tungsteno a alta temperatura. En este proceso parte de los carburos pueden disolverse y precipitar en el interior de la matriz endureciéndola o difundirse en ella. Para evaluar este fenómeno se decide utilizar el análisis elemental mediante EDX sobre los cortes realizados para el estudio metalográfico. En esta

técnica un haz de electrones es utilizado como fuente de excitación para producir una transición en el nivel de energía de los electrones de un átomo de manera que se produce la emisión de un fotón en la banda de los rayos X liberando la energía extra suministrada. Los rayos X producidos son analizados por un espectroscopio de rayos X que evalúa el número y la energía de estos. Dado que la energía específica de los rayos es característica de cada elemento de la tabla periódica se puede realizar el análisis químico de las muestras. Con esto se trata de evaluar si los parámetros utilizados tienen valores de dilución de carburos aceptables. El análisis también permite realizar mapas químicos, utilizados en otros estudios de FGM para determinar el cambio de concentración. En este caso no es posible realizar el estudio de concentración basándose solo en el análisis químico de la matriz, debido a que los elementos que definen este cambio no están presentes en ella. Sin embargo nos permite estudiar la variación de la composición de la matriz al cambiar la concentración de la fase de refuerzo que permite explicar cambios en las propiedades de la misma, así como contabilizar material perdido que no se observa en el análisis estereológico.

3.5. Estudio Estereológico de la fracción volumétrica de WC

En el estudio estereológico se determina la relación volumétrica entre la fase de carburo de tungsteno no disuelta y la matriz de NiCrBSi. El análisis estereológico de una probeta requiere de un muestreo aleatorio del interior del material. Este muestreo normalmente se realiza cortando la muestra en planos paralelos equidistantes entre sí y analizando la presencia de la fase de interés respecto a diferentes métricas mediante una inspección aleatoria del corte. Existen muchas características de la estructura del material que pueden determinarse mediante este estudio. Para el caso tratado en esta tesis solo es de interés la fracción de volumen. La relación en volumen de una o varias fases determinadas se establece mediante el principio de Delesse. En este se enuncia que la relación entre el área ocupada por dos fases observada en un plano corresponde a la relación en volumen de estas mismas fases cuando este plano corresponde a un corte arbitrario del volumen y las fases están

distribuidas homogeneamente.

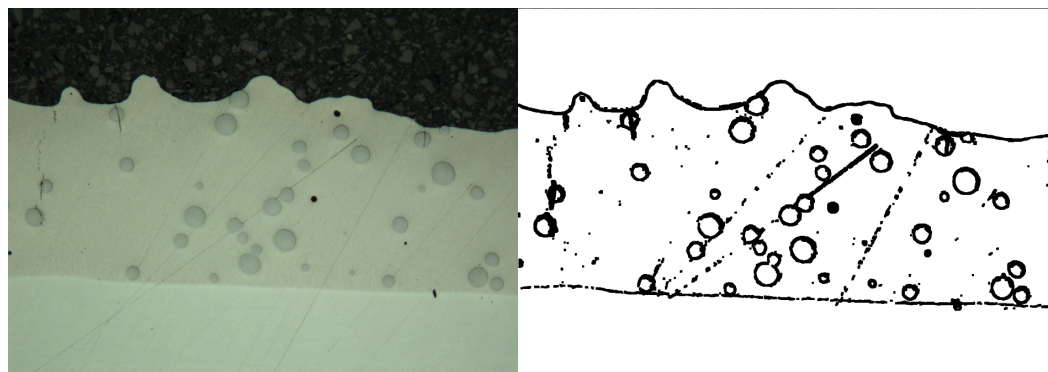
Para determinar esta relación de área, el método más habitual consiste en generar una cuadrícula a intervalos regulares sobre la imagen del corte y contar cuantos puntos de la cuadrícula coinciden sobre la imagen de la fase estudiada. El resultado se considera una muestra aleatoria de la distribución de las fases en el material y la media aritmética coincidirá con la relación en volumen buscada. La distribución de la medida corresponderá al de una función binomial. La aleatoriedad de la muestra se garantiza porque el punto tomado para el inicio de la cuadrícula es determinado al azar y la independencia de la muestra se garantiza por la distancia entre los puntos de la cuadrícula. En el estudio estereológico es importante tener en cuenta el factor humano en determinar si la intersección cuadrícula se halla o no en la fase examinada. Para ello muchas veces se utilizan ayudas gráficas representadas sobre la cuadrícula. Actualmente, es generalmente más efectivo utilizar el análisis computerizado de las imágenes digitales de los cortes; para ello la mayoría de microscopios poseen una cámara incorporada capaz de exportar la imagen a cualquier soporte digital. Uno de los problemas del análisis computerizado son las irregularidades, perturbaciones y ruido en la imagen como, por ejemplo, el resultado de una iluminación desigual, una sombra direccional o la presencia de objetos extraños en la imagen como óxidos o discontinuidades. En esta tesis se han analizado las muestras mediante el uso de una segmentación con un threshold simple para los carburos sinterizados y la aplicación de una detección automática mediante la transformada de Hough en el caso de tener carburos esferoidales.

3.5.1. Métodos de análisis de imagen

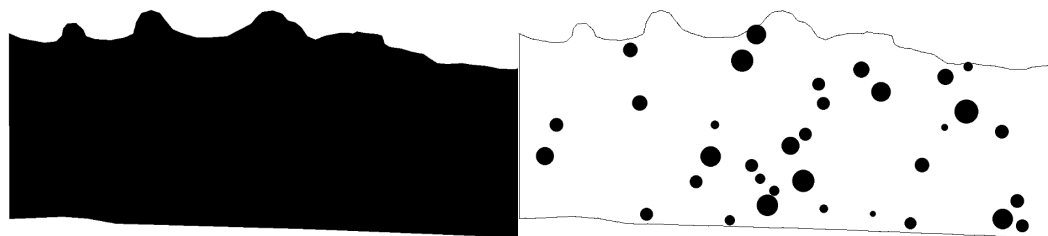
Encontramos dos casos donde la segmentación de la imagen tiene que realizarse de manera diferente; un caso con carburos esferoidales y otra con pequeñas partículas de carburo formando clústeres debido al sinterizado.

Carburos esferoidales

En el caso de los carburos esferoidales (ver figura 3.7) los tonos de las imágenes son similares y resulta difícil segmentarlos de acuerdo a sus niveles. Además la ilu-



(a) Imagen de la metalografía de partida sin procesar
(b) Detección de bordes y preprocesado de las metalografías



(c) Calculo de la transformada de Hough
(d) Mascara, carburos detectados mediante el método

Figura 3.7: Procesado de las imágenes para la detección de Carburos. Detalle

minación no es homogénea lo que hace imposible encontrar un valor de threshold consistente. No obstante la elevada dureza de los carburos produce que estos sobresalgan mínimamente de la matriz permitiendo observar sus contornos. La decisión para la segmentación es entonces realizar la identificación de las fase de carburos mediante los bordes detectados en la imagen. Para esto se desarrolla un proceso en dos fases; en la primera, el preprocesado de la imagen se efectúa mediante un filtrado paso bajo con la finalidad de evitar el ruido en la imagen o el efecto disruptor de pequeñas imperfecciones en la matriz como poros o rayado debido al pulido. Tras el filtrado se aplica la detección de bordes mediante un filtro diferencial, en este caso Canny Edge (implementación ImageJ). La segunda parte es la detección de los carburos propiamente dicha, como en este caso los carburos son de forma esferoidal pueden detectarse mediante un algoritmo de clasificación en el espacio de

parámetros generado a partir de la transformada de Hough de la imagen binarizada. La transformada de Hough es una operación que transforma un tipo de curva paramétrica de un espacio a un punto en el espacio de sus parámetros de manera que por ejemplo permite la identificación de cualquier curva paramétrica en el plano, la transformada de Hough también puede ser generalizada para curvas arbitrarias. En el caso particular de la detección de carburos se debe construir la transformada para la curva $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$ La implementación del algoritmo se realiza mediante diferentes lookup tables que representan la función implícita de la curva y una matriz o array multidimensional, donde las dimensiones de la matriz corresponden a los parámetros de la curva.

El proceso de calculo es sencillo, hay que integrar la tabla por cada cada punto de la imagen guardando el resultado en la matriz de parámetros, como si la tabla se tratase del kernel de una convolución. Tras realizar la transformada se localizan los picos en la imagen que corresponden a cada curva detectada.

En el caso particular de los carburos la curva paramétrica posee tres dimensiones a,b,r, lo que obliga a utilizar un espacio de memoria en función del cubo de las dimensiones de la imagen, esto no es viable debido al tamaño de las imágenes procesadas y la enorme cantidad de memoria que supone reservar.

Para solucionar el problema se propone un algoritmo personalizado en el que la transformada de Hough se computa iteradamente sobre una matriz de las mismas dimensiones que la imagen original, computando en cada iteración un único valor de r. Tras el cómputo de la transformada en cada iteración se realiza una discriminación de los máximos calculando un threshold para diferenciar los valores más altos y realizando una detección sencilla de picos en cada región, determinada por la segmentación, para verificar que no se trate de un falso positivo debido al ruido. Los resultados se almacenan en un mapa de memoria en una tercera imagen en que cada punto adquiere un valor dependiendo de su posición con respecto de cada curva detectada iterando sobre los resultados el paso anterior. De esta manera pueden detectarse tanto las intersecciones entre círculos como el radio máximo de cada centro con solo leer la matriz solución al final del proceso, discriminando los posibles falsos positivos. El resultado final se presenta como una máscara sobre la imagen

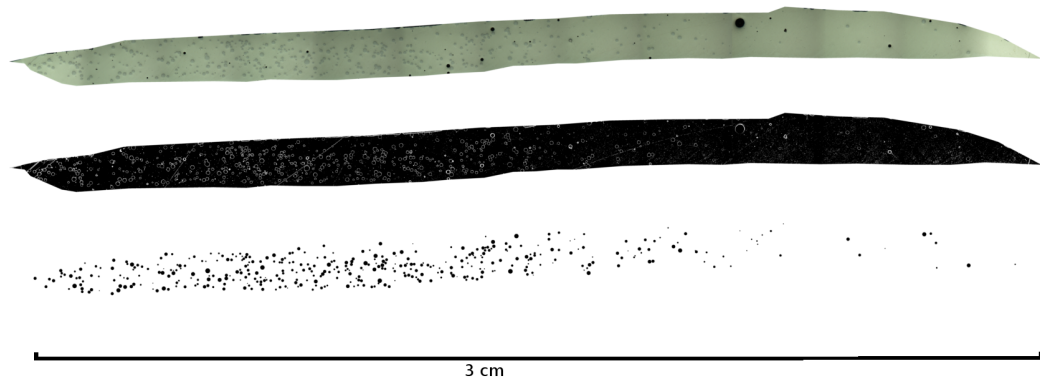


Figura 3.8: Imagen del proceso de segmentación de una metalográfica con polvo de carburo esféricos

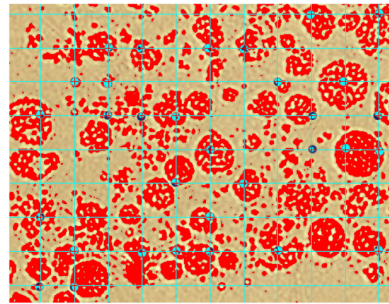
original(ver figura 3.8) al mismo tiempo que se exportan los valores a un archivo. Tras la segmentación determinar la relación entre las dos fases puede hacerse por cualquier método de análisis convencional.

Carbueros sinterizados

En el caso de los carburos sinterizados el pequeño tamaño de los granos de WC en cada partícula de polvo hace que estos muestren una superficies irregulares y reflejen la luz con menos intensidad que la matriz pudiéndose obtener imágenes de cierto contraste ajustando el plano focal del microscopio. La segmentación se realiza mediante un threshold sencillo y el resultado binarizado puede ser contado por cualquier método automático convencional (ver figure 3.9).

3.5.2. Cuantificación de las fases

La relación volumétrica entre las fases no es suficiente para determinar los resultados del estudio ya que son menos significantes que la relación en masa. Los valores medidos para las imágenes han de ser traducidos a valores de masa. Para ello se debe validar la densidad del material mediante el estudio de las metalografías de los cortes de los cordones, los resultados de este análisis se presentan en el capítulo 5.



30/88 34%

Figura 3.9: Imagen de la segmentación de una metalográfica con polvo de carburo sinterizados

3.5.3. Medición de la concentración en los gradientes

El estudio estereológico de la relación en volumen entre las dos fases se utiliza para determinar la tasa de cambio de concentración del gradiente y así verificar si el control de la composición se efectúa correctamente. Sin embargo la medición del cambio de composición no es inmediata. El estudio estereológico habitual solo es aplicable cuando la distribuciones entre las fases son homogéneas, lo que limita el estudio a las áreas de material con composición constante. Esto sugiere que para analizar la tasa de cambio de composición en un gradiente se requiere estudiar los diversos cortes realizados en las secciones transversales a la dirección del cambio de composición tal y como se muestra en la figura 3.10, donde se espera una distribución uniforme de los carburos. En la práctica, una metodología de este tipo no es viable debido al gran número de muestras que sería necesario preparar y la reducida precisión y resolución a la hora de determinar la tasa de cambio. Por un lado habría que llevar un registro preciso de la posición de cada corte, lo que no es sencillo teniendo en cuenta que la posición de la superficie visible en cada corte cambia tras el pulido del material y el número de puntos que es posible medir queda limitado por la mínima sección que la máquina de corte pueda conseguir. En otro tipo de estudios de similares características, el problema se resuelve utilizando un análisis de composición sobre un corte donde el gradiente sea visible. En estos casos se analiza cada punto mediante EDS, pero eso solo es posible cuando se produce la

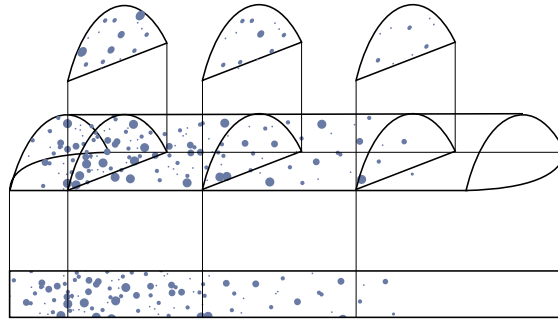


Figura 3.10: Diagrama de los cortes para la inspección de la fase de carburos en un cordón con gradiente

disolución o difusión de los elementos presentes en cada material en polvo usado en el gradiente. En estas circunstancias, es posible, conocida la composición relativa de cada componente de polvo determinar que relación de cada elemento corresponde a la composición de cada punto de la muestra final. Este método tampoco es posible en el caso estudiado, ya que los distintos materiales se encuentran dispersados en volúmenes discretos de composición constante y es la estructura de esta dispersión de elementos la que determina la gradación.

La alternativa es aplicar el estudio estereológico analizando líneas en vez de áreas del material, asumiendo que en una de las direcciones del espacio la concentración es constante. Esto es una solución parcial que permite la medición de los gradientes generados en cordones de composición heterogénea, suficiente para las pruebas realizadas pero no válido para una caso general. Se puede explicar que el principio de Delesse establece que la relación entre volúmenes es igual a la relación entre áreas que es igual a su vez a la relación entre segmentos en una línea. En el caso de analizar un cordón de composición heterogénea la coordenada x se determina como la dirección en la que se produce el gradiente y la línea perpendicular a la dirección del gradiente en cada x se asume que tiene una composición homogénea. Su estudio será equivalente al estudio de las áreas transversales como se muestra en la figura 3.10. En este se caso se mide la longitud de secciones de la línea que coinciden con la fase de carburos respecto a la longitud total y se realiza la media de varios valores de x . En estos estudios la distribución de la variable ya no corresponde con una binomial.

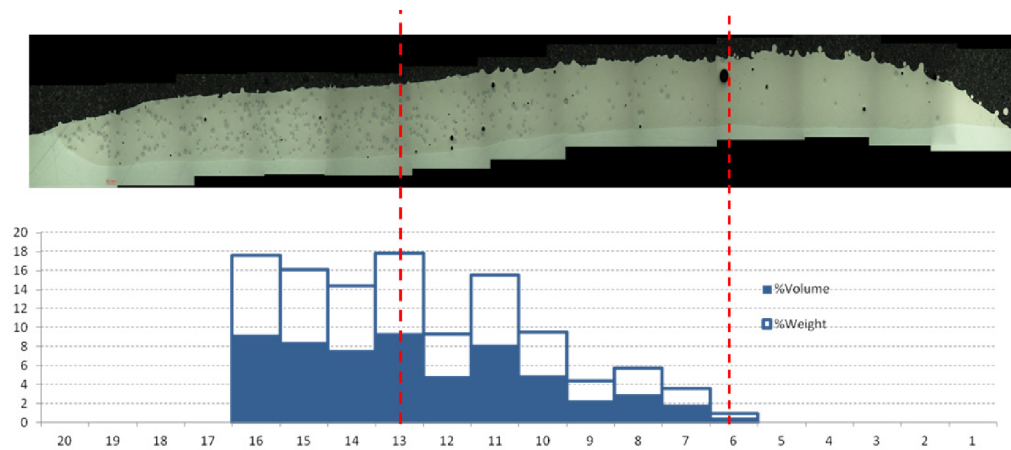


Figura 3.11: Metalografía de un gradiente longitudinal con respecto a la medición de concentración volumétrica de CW

Además en cierta manera no se puede afirmar categóricamente que las líneas posean composición constante pero es una forma de presentar los resultado acorde con la idea intuitiva de gradiente. En un principio, al aplicar la media de varias posiciones de x de alguna manera se limita el problema. La distribución del valor tenderá a una normal y el resultado proporciona una idea aproximada de las tasa de cambio. La resolución obtenida es del orden de un milímetro. Se puede ver una muestra del resultado en la figura 3.11.

Capítulo 4

Configuración experimental

4.1. Actuadores en la instalación (LMD)

4.1.1. Fuente Láser: ND:Yag Láser continuo Rofin 2KW

La Fuente láser usa un medio activo de estado solido formado por barras de cristal de ND:YAG bombeado por diodos. Es capaz de generar una potencia de hasta 2KW en una longitud de onda de 1064 nm. Esta acoplado a una fibra óptica de 300 micras que conecta con el colimador del cabezal, el sistema permite intercambiar hasta 6 fibras. Posee un modo axial Tem00, una estabilidad de potencia en torno al 2% y una calidad de haz de 12 milímetros por microradián. Permite el funcionamiento en modo continuo y pulsado con una frecuencia máxima de 250 hz y un milisegundo de duración de pulso. La potencia del pulso puede ser configurada entre 110 y 2200 W. La fuente del láser dispone de una unidad de control que habilita su operación desde terminal táctil o mediante un bus externo formado por señales digitales de 25v y dos analógicas para el control de potencia.

4.1.2. Cabezal de LMD

Cabezal láser de orientación coaxial YC50 precitec, con adaptador personalizado para la tobera discreta del modelo YC30. Posee un conector para fibra óptica y colimador con una apertura de 48 mm y una focal de 200 mm con un spot mínimo de 0.5 mm. Lleva incorporado una ventana de protección con sistema de monitorización

propio y un divisor de haz que permite dirigir el retorno óptico hacia un circuito externo para análisis del proceso. Lleva dos entradas de gas conectadas a dos electroválvulas del sistema neumático y que desembocan a la tobera coaxial (YC50); la tobera tiene una salida central para el gas que genera una atmósfera de protección alrededor de la pieza procesada, cuatro entradas para el polvo y una de refrigeración por agua. Posee también una cavidad en forma de anillo que se extiende desde la parte posterior, mas cercana al colimador, hasta la punta de la tobera y por la que circula el polvo, en esta cavidad se genera el flujo laminar que focaliza el material sobre el spot del láser. Posee un foco de polvo ajustable entre un mínimo de 0,7 milímetro a 4 milímetros de diámetro con distancia de trabajo de entre 10 a 14 mm, permite tamaños de partícula entre 50 y 250 micras. El segundo tipo de tobera (YC 30) posee un bloque cónico de cobre con circuito de refrigeración y una entrada de agua; posee cuatro entradas de polvo conectadas a cuatro toberas tubulares que se sitúan radialmente en el bloque orientadas hacia el extremo de menor diámetro del cono. Las toberas convergen sobre un punto a 10 mm bajo el bloque cónico con un ángulo fijo; la distancia al punto de convergencia es ajustable. El bloque de soporte posee un canal axial central por el que circula el gas de protección. Cuando esta tobera es utilizada una de las tomas de gas del cabezal queda cerrada. La distancia de trabajo esta entre los 11 y 16 mm el spot mínimo de polvo es de 2.5 milímetros.

4.1.3. Sistema Posicionador: ABB Brazo Robótico 6-Ejes

Brazo robótico industrial de 6 ejes de tipo articulado. Posee una carga útil de 16kg, un rango de velocidad entre 0.4 y 1000 mm/s, una precisión de posicionamiento de hasta 0.3 mm y un error de seguimiento de trayectoria de hasta 1mm. El máximo espacio de trabajo permitido es de 1.8 metros. Peso 385 kg

4.1.4. Alimentador de polvo: Sulzer Metco 10 Twin-C

El sistema del alimentador de polvo lo conforman una tolva de almacenamiento de polvo con agitador una cámara presurizada con un disco metálico que distribuye el polvo accionado por un motor de corriente continua, un circuito de neumático

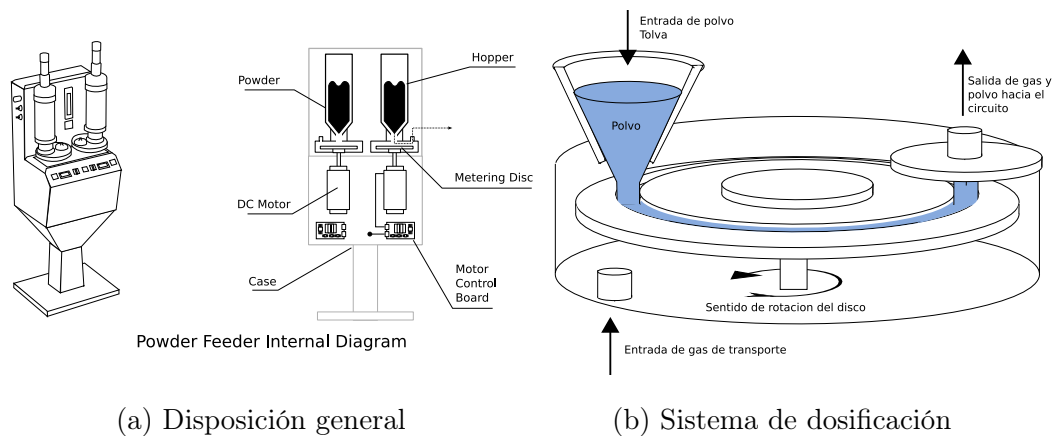


Figura 4.1: Esquema de funcionamiento del alimentador de polvo

de entrada con regulador de presión y un sistema de control electrónico con un bus de externo para diferentes señales de digitales y analógicas. La cámara presurizada donde se encuentra el disco, posee dos orificios de entrada y salida de gas, uno en la parte inferior hacia el circuito del alimentador y otro en la parte superior de la cámara hacia el cabezal de deposición, ver figura 4.1. El alimentador de polvo manda dosis medidas de polvo hacia el sistema neumático, permite el uso de diferentes tolvas y discos métricos así como gases de transporte Argón, Helio o Nitrógeno. El gas de transporte sufre una reducción de presión antes de entrar en la cámara del disco bajo condiciones de flujo controladas. Al mismo tiempo el disco transporta el polvo volumetricamente desde la tolva de almacenamiento hasta el inyector; el sistema de controls del alimentador supervisa esta secuencia pero también puede controlarse desde el bus externo.

4.2. Materiales

4.2.1. Metco12c – NiCrBSi.

El Metco12c forma parte de una serie de aleaciones de nickel autofundentes con una probada trayectoria en aplicaciones de mejora de la dureza superficial. El material viene suministrado como polvo con un tamaño de partículas $-125+53$ atomizado por gas. El metco12c esta recomendado donde sean suficientes durezas de 35HRC para soportar el desgaste y donde la mecanizabilidad de la superficie tenga

que tenerse en cuenta. La temperatura de fusión del material ronda los 1046 °C.

4.2.2. Deloro30 – NiCr hardfacing alloy

Es una aleación autofundente de NiCrBSi con bajo contenido en cromo destinada a su uso como material de recubrimiento para la mejora de la dureza superficial. Similar al Metco 12c en función. El polvo está atomizado con gas y un tamaño de partícula $-125 +45$ recomendado para aplicaciones de dureza 30HRC.

4.2.3. Woka 3303 – WC.-Ni

Woka 3303 es un polvo aglomerado esferoidal, creado por sinterizado para proyección térmica que contiene una distribución uniforme de 90 % de carburo de tungsteno con granos de carburo de tamaño medio como fase dura y un 10 % de níquel que actúa como aglutinante metálico. Las distribuciones de tamaño de partícula más finas de esta clase de polvos producen recubrimientos muy densos y fuertes que pueden ser utilizados tal y como quedan depositados son necesidad de un acabado post recubrimiento. En general los recubrimientos hechos de carburo de tungsteno son resistentes frente a la abrasión, el martilleado y el desgaste deslizante. Este polvo se utiliza casi exclusivamente para recubrimientos resistentes a la abrasión en ambientes secos. Su uso a atmósferas con temperaturas superiores a los 500 °C no es recomendable para prevenir la oxidación del carburo de tungsteno. El tamaño de partícula está $-45 +11$.

4.2.4. MetcoClad52001

MetcoClad52001 es un polvo de carburo de tungsteno con partícula esférica. Estos carburos tienen una estructura menuda no acicular con mayor dureza que los carburos de tungsteno convencionales. La densidad aparente y la fluidez incrementadas aumentan la cantidad de fase dura presente en los recubrimientos de resistencia al desgaste. Este material puede ser mezclado con un material con matriz de aleación de níquel para aplicaciones de recubrimiento con láser.

	Woka 3303	Deloro30	Metco12c	MetcoClad 52001
B	-	1.1	2.5	-
C	5.5	0.12	0.15	3.8
Cr	-	8.6	10	-
Fe	-	2.2	2.5	-
Ni	10.9	bal	bal	-
Si	-	4	2.5	-
W	bal	-	-	bal
Others	-	-	-	0.7

Tabla 4.1: Tabla con la composición de los materiales en polvo utilizados

4.2.5. MetcoClad 316L - Si

Acero inoxidable austenítico en forma de polvo, atomizado por gas para sus uso en procesos de deposición por láser. Utiliza una composición baja en carbono para reducir la precipitación de carburos en los bordes de grano, molibdeno para evitar el pitting y silicio para proporciona un efecto autofundente durante la deposición, posee unas propiedades de resistencia a la corrosión e impacto similares al AISI 316L. El tamaño de partícula varia entre los 106 y las 44 micras. Una densidad aparente de 4.5 kg/cm³ y una densidad neta de 8 kg/cm³

4.2.6. Sustrato de Acero AISI 316L

Una Plancha plana de 50 mm de ancho por 10 mm de espesor fabricada mediante laminación hecha de acero inoxidable AISI 316L; la composición de la plancha contiene Carbono al 0.16 %, 10 % de Nickel, 16 % de Cromo 2.3 % de molibdeno principalmente.

4.3. Dispositivos de adquisición de datos y controladores.

4.3.1. Fotodiodo: precitec LWM-T detector

Este detector basa su funcionamiento en un fotodiodo que captura la radiación emitida por un cuerpo incandescente y la convierte en una señal eléctrica que es monitorizada desde el PC de la instalación. El detector cuenta con una apertura ajustable, una lente axialmente ajustable con un recorrido de 13 mm y una focal de 100 mm que permite el enfoque del baño fundido. El montaje esta realizado sobre un cilindro de acero de 160mm y esta conectado a la salida del cabezal mediante 2 divisores de haz. La conexión analógica tras el fotodiodo posee una amplificador con dos canales y con un factor de amplificación entre 100 y 100000; debido a las pérdidas ocasionadas por los 2 divisores de haz solo un 1 % de la luz total llega al fotodiodo obligando al sistema a hacer uso de los valores de amplificación más altos. El sensor se haya tras una serie de filtros que limitan el espectro transmisible a un rango de frecuencias de 1100 a 1800 nm. Lo que provoca que el fotodiodo solo sea sensible a la respuesta térmica de la superficie del baño fundido. La seña obtenida sera proporcional a la temperatura media de la superficie enfocada, aproximadamente 2 mm alrededor del foco del láser.

4.3.2. Sensores de Imagen:

Este clase de dispositivos detectan y transmiten un array de datos de 1 o 2 dimensiones que contiene información acerca de la distribución espacial de la intensidad de radiación electromagnética en una superficie. Mediante un sistema óptico esta información puede ser correlacionada con la distribución angular de intensidad de luz para constituir una imagen a partir de la señal óptica trasmitida a través de un medio.

Cámara CMOS de Alta velocidad

El dispositivo de adquisición de imagen utilizado modelo Mikotron 3CL es una cámara de alta velocidad diseñada para aplicaciones de visión artificial y monitorización de procesos industriales. La característica mas destacable del dispositivo es la capacidad de transferencia y procesamiento de los datos adquiridos en tiempo real, con una tasa de transferencia de hasta 850 mbytes segundo. La electrónica y el firmware permiten la lectura de fracciones del sensor, lo que le permite transferir imágenes parciales de pequeño tamaño a muy alta frecuencia. El sensor combina esta función con una alta sensibilidad y un buen rango dinámico, características que facilitan las configuraciones experimentales en la que se requiere monitorización continua a alta frecuencia.

La cámara se utiliza para adquirir imágenes de un jet de multifásico gas-sólido. Este jet se produce por las partículas de polvo que atraviesan el sistema neumático de la instalación al cruzar la tobera del cabezal de polvo donde los distintos flujos de gas impulsan las partículas formando el jet.

La adquisición de imágenes se realiza con dos objetivos: determinar el tamaño del haz de polvo para ajuste de los tiempos de retraso del polvo y para la observación de las partículas de polvo en el jet. Estas dos funciones utilizan configuraciones experimentales ligeramente diferentes, explicadas en apartados posteriores. El sensor de imagen utilizado en la cámara posee 1696x1710 pixels CMOS de obturación global y alta sensibilidad con un tamaño de 8x8 micras que permiten la integración durante la lectura. El sensor produce imágenes de 8-bits con 3 megapixels de resolución a una velocidad de 485 fps. Sensibilidad 3.81 V/lux*s @ 550 nm y elevado factor de relleno con un tiempo mínimo de exposición de 1 microsegundo. La cámara se utiliza junto a dos objetivos, una lente de 35 mm y un zoom de 130 mm con capacidad de 10 aumentos y apertura. Al sistema se le incorpora un filtro notch 1064nm para bloquear la luz del láser o un filtro paso banda centrado en 405 nm para evitar la influencia de la luz del láser y del baño fundido durante el proceso.

Para obtener un ancho de banda 850 mbytes/s se utilizan dos cables Camera Link de 32 pares de cobre conectados a un framegrabber en el pci-x del computador. Además el bus posee una conexión serial para la comunicación de órdenes y la lectura



Figura 4.2: Imagen del cabezal de la instalación (YC30) durante la medida del retraso del estado del dispositivo.

4.3.3. Iluminación

Láser de iluminación diodo Blue-ray:

diodo láser de 400mW en 405 nm de longitud. El láser puede ser desfocalizado hasta un ángulo de 30° y posee una anchura espectral de menos de 5nm. Este diodo es utilizado como iluminación, desfocalizado para abarcar un haz de polvo de 5mm de diámetro a unos 20 cm de distancia.

4.3.4. Tarjeta de Adquisición DAQ

La tarjeta de adquisición es un controlador conectado al bus pci del ordenador y funciona como un dispositivo convertidor analógico digital. Posee funciones de entrada y salida analógico/digital y sincronización de entrada y salida. Posee 12 bits de rango dinámico para entrada/salida, 16 canales y 12khz de frecuencia de muestreo por canal. En la instalación del sistema se emplean tres entradas analógicas; una de ellas esta conectada al amplificador del sensor de temperatura y otras 2 a través de un divisor de voltaje a cada uno de los tacómetros de los motores de las tolvas del alimentador de polvo. Una entrada digital conectadas a la señal de activación del haz láser se utiliza para sincronizar el controlador del posicionador y el PC de adquisición de datos.

4.3.5. PC

Un un sistema Intel x86-compatible , con sistema operativo windows 7. En el se ejecuta los programas de adquisición de datos de la instalación y análisis de imagen.

4.4. Software y soluciones Software

La alta frecuencia de de adquisición necesaria en algunos experimentos y el uso del framegrabber hacen necesario desarrollar una solución de software específica para el almacenamiento y procesado de los datos así como para la sincronización con el resto de sensores del sistema. El software que gestiona el procesado de las imágenes y adquisición de los datos desarrolla en visual C utilizando la bibliotecas suministradas con el hardware para el manejo de los periféricos de entrada,sobre Windows 7. El software que se utiliza para el análisis de vídeos esta programado en OpenCV y las rutinas de control del alimentador de polvo están desarrolladas en el lenguaje del fabricante del robot (ABB RAPID).

4.5. Configuración de la instalación LMD**4.5.1. Disposición general de la instalación LMD.**

El cabezal de cladding se encuentra sujeto al soporte de herramienta del brazo robótico, cuya base esta anclada al suelo, de manera que en la posición de marcas esta queda perpendicular al suelo y a la mesa de trabajo. El cabezal va conectado a la fibra del láser, el sistema neumático y el alimentador de polvo. Los sensores que se encuentran conectados al circuito óptico del cabezal van conectados a alimentación y al PC de la instalación, ver figura 4.4. El circuito neumático comienza en un almacén de botellas en la parte posterior de la celda, en el tramo desde las reductoras de presión, el circuito se divide en tres lineas; dos de ellas incluyen caudalímetros y se dirigen a las electroválvulas situadas sobre el brazo robótico, mientras que el tercero se dirige al alimentador de polvo que cuenta con su propios sistema para el acondicionamiento de la presión y caudal de gas. La primera electroválvula controla

el flujo de gas coaxial que forma la atmósfera de protección y la segunda, el flujo de gas lateral que circula por el interior de la tobera. La línea del circuito que va al alimentador de polvo se divide en dos partes una para cada tolva de almacenamiento de polvo y tras cruzar las tolvas y el mecanismo de dosificación de polvo estas líneas se vuelven a juntar. En este punto se produce el mezclado del polvo de las dos tolvas que da lugar a la composición heterogénea usada en la generación de gradiente. Tras esta unión la línea se multiplexa en cuatro para las cuatro entradas de polvo del cabezal de cladding.

4.5.2. Aporte de gas.

Para reducir el efecto de la oxidación debido a las altas temperaturas en el baño fundido se genera una atmósfera de nitrógeno sobre el área calentada por el láser. Para generar esta atmósfera inerte, el nitrógeno se inyecta sobre la pieza desde el centro del cabezal, usualmente en una dirección perpendicular a la superficie del sustrato. El flujo de nitrógeno utilizado para esta función se mantiene normalmente constante y en los experimentos descritos posteriormente es de Cuando se utiliza la tobera del YC50 un segundo flujo es necesario para focalizar las partículas de polvo. Este flujo de gas tiene como objetivo propulsar la partícula hacia el spot del láser sobre la pieza, es necesario ajustar los dos flujos de gas para obtener un tamaño de foco determinado, en los experimentos realizados el valor es de 15 l/min En el caso de la tobera del YC30 el flujo de gas que proviene del alimentador es determinante para la formación del haz de polvo, en este caso es relevante mencionar el caudal utilizado 20 l/min;

4.5.3. Posición del foco.

La posición del foco es el punto del eje longitudinal del haz láser donde la distribución de energía tiene una dispersión menor, menor desviación desde el punto medio de una sección transversal perpendicular al vector de avance del haz. Esta posición viene determinada por la distancia de la superficie de trabajo a la lente del láser que se encuentra en el cabezal del mismo y se mide normalmente con respecto

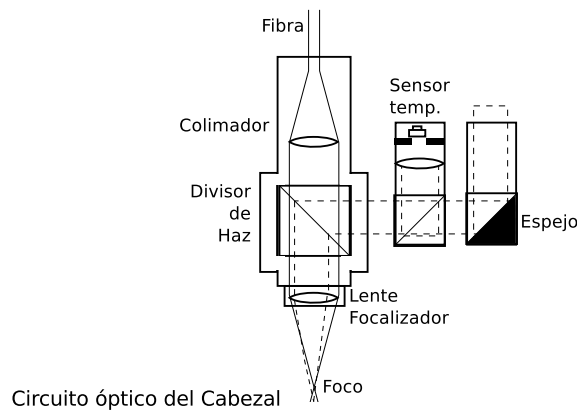


Figura 4.3: Diagrama del circuito óptico del cabezal LMD

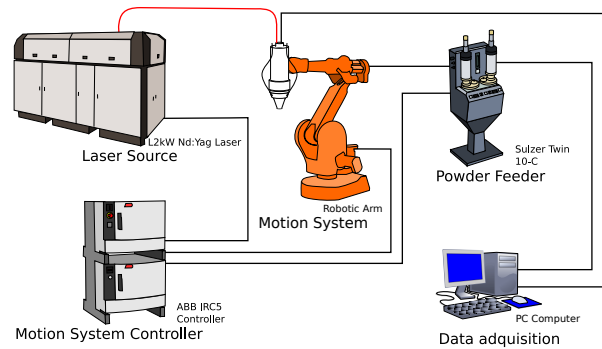


Figura 4.4: Diagrama de la disposición general de la instalación

a la superficie de la pieza, ver figura 4.3. Diferentes aspectos del proceso láser dependen de la posición del foco. El parámetro más relevante para el proceso, es el área superficie irradiada, este valor depende de la posición del foco con respecto a la pieza, que es ajustable y de las características del haz determinadas por la apertura del sistema óptico, la longitud de onda del láser y la calidad de la fuente láser utilizada, que normalmente solo varían de una instalación a otra. Para el trabajo presentado la determinación del valor del foco se ha realizado experimentalmente. En las pruebas de estudio de parámetros para la deposición de los pares NiCr - WC el valor de foco utilizado es 2 a 2.7 mm. Finalmente destacar que para las pruebas donde la deposición se realiza superponiendo capas de material la posición del foco no se puede determinar con precisión y se debe realizar una estimación teniendo en cuenta la superficie del cordón generado y su altura media esperada.

4.5.4. Calibración del Polvo.

Para poder controlar el alimentador es necesario obtener un modelo del flujo de polvo a partir de la velocidad de rotación del disco, que es el principal parámetro de control de la máquina. Esta relación velocidad flujo se obtiene midiendo el peso de polvo transportado por el alimentador hacia el resto del sistema durante un intervalo de tiempo en el que el disco esta girando a una velocidad constante. Esto supone crear un modelo del funcionamiento en estado estacionario que no es mas que un mapa entre la velocidad del disco y el peso medido. Para tener unos valores más universales se expresa el aporte de polvo en función de la relación entre velocidad del disco y su velocidad máxima. Esto permite trabajar con magnitudes genéricas relativas a la máquina que eviten complicaciones con áridos aspectos técnicos del alimentador. Dicho esto, se utilizara a lo largo de este trabajo la velocidad del motor en puntos de porcentaje sobre la velocidad máxima del mismo y el peso de polvo en miligramos por segundo. Para obtener los mg por revolución solo hay que determinar el máximo numero de revoluciones, calcular el numero de revoluciones a una velocidad determinada y dividirlo entre el flujo másico obtenido pero esto no resulta de interés alguno para el proceso. En este tipo de alimentadores mecánicos la dosificación del polvo se realiza de manera volumétrica, el disco pose una ranura que se llena de polvo y que al avanzar transfiere siempre el mismo volumen de polvo. En consecuencia el flujo obtenido sera linealmente proporcional a la velocidad. Esto permite generar el mapa entre velocidad y flujo haciendo una sencilla regresión lineal. Es de esperar pequeñas distorsiones debido a que la linealidad posiblemente no se mantiene en todo el rango de velocidades del alimentador así como problemas del controlador, pero en este paso no es necesario tenerlas en cuenta. Los valores de calibración son independientes para cada material, debido a poseer densidades aparentes diferentes y a la tolva ya que los controladores del motor del disco son ligeramente distintos para cada uno de los dos contenedores. En la siguientes figuras 4.5 se muestran las calibraciones para todos los materiales utilizados en esta tesis.

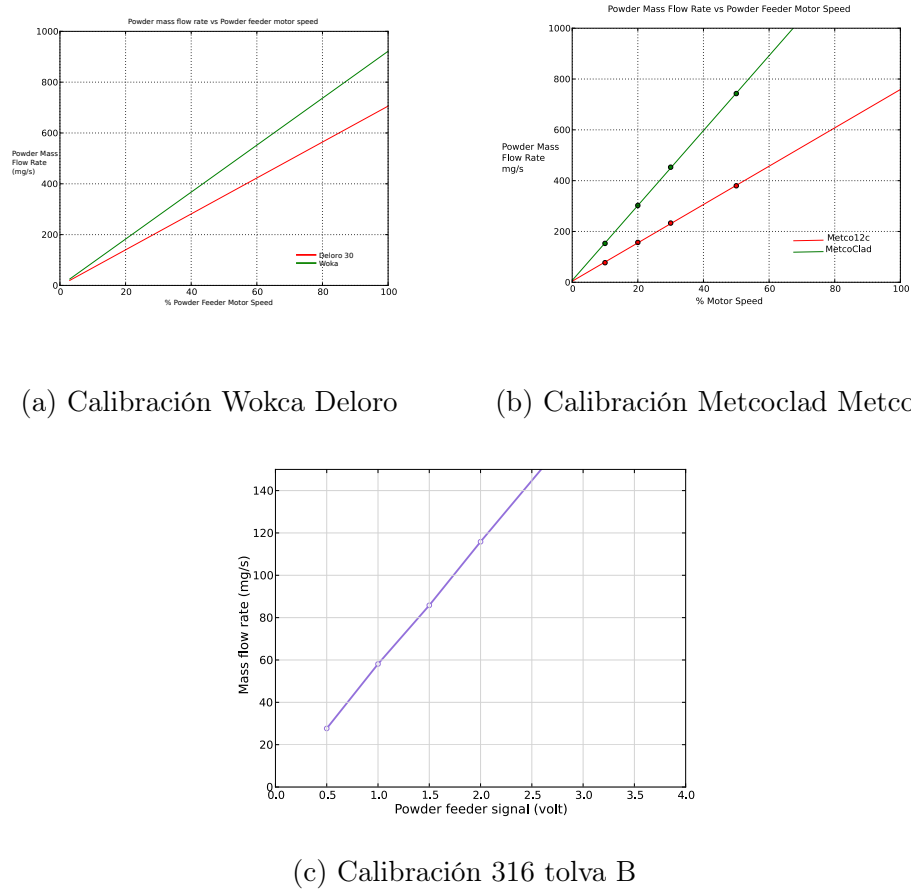


Figura 4.5: Gráficas de la calibración del polvo

4.6. Configuración del sistema de monitorización óptica.

En los estudios con sensores de imagen se usan dos configuraciones distintas; una para medir el retraso medio del polvo con respecto al posicionador y otro para monitorizar el flujo másico de polvo en tiempo real. En la primera configuración (ver figura 4.6) una cámara CMOS se utiliza para grabar la imagen del polvo saliendo a través del cabezal y este se sitúa en una caja sellada y oscura para incrementar el contraste. Cuando se produce el haz de polvo al activar el alimentador se ilumina el polvo mediante un haz de luz calibrado para generar una imagen lo más clara posible. La imagen del polvo se monitoriza con la cámara y un sencillo análisis de imagen determina una medida de la intensidad del haz en cada pixel. Un haz de

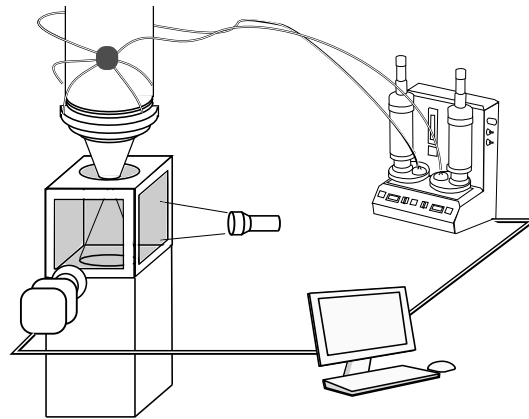


Figura 4.6: Gráfica de la configuración experimental para la medición del retraso

mayor cantidad de polvo genera una imagen más amplia (ver figura 4.2) y más intensa en la cámara aumentando el valor de la medida. No se puede realizar una cuantificación del flujo basándose en este experimento, pero es posible detectar una variación del flujo con el tiempo. Generando un brusco cambio en el movimiento del disco y midiendo cuanto tardamos en detectar su efecto en el haz es posible determinar el tiempo que ha tardado la perturbación en recorrer todo el sistema neumático, si se estima la distancia recorrida por el pulso se podría determinar la velocidad media del polvo pero no es necesario para el desarrollo del proceso conocer esta velocidad. Para realizar las mediciones, el movimiento del disco se acciona desde el controlador del posicionador, los datos se recogen en la tarjeta DAQ y el PC en que se encuentra la tarjeta almacenara sincronizadamente las imágenes y los valores de las señales del motor. La resolución temporal máxima es del orden de milisegundos pero para la medición de los retraso se ha utilizando una frecuencia de 30Hz

La segunda configuración de sistema de imagen utilizada (ver figura 4.7) para medir el flujo del polvo, requiere de una orientación encuadre y precisos. El objetivo es observar las partículas de polvo en el foco del haz de manera que se puedan distinguir las partículas estáticas sin que su imagen aparezca movida formando una traza. Para esto los tiempo de integración deben ser pequeños con lo que una iluminación potente y un sensor con buena ganancia son necesarios. Además las partículas son de pequeño tamaño y están distribuidas en un radio de 1.5 mm alrededor del centro del foco. Para captarlas se necesitan varios aumentos ópticos y un buen ajuste del objetivo que mantenga todas las partículas dentro de la profundidad de campo

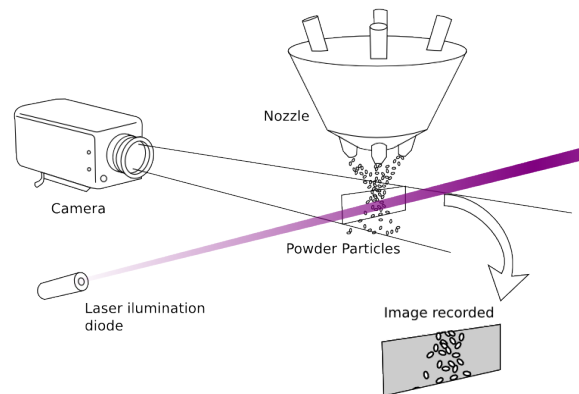


Figura 4.7: Configuración experimental para la monitorización de las partículas de polvo

disponible. La cámara va situada sobre un trípode para poder ser posicionada y orientada adecuadamente. Durante las pruebas la cámara se fija a unos 15 - 45 cm de la boquilla de la tobera enfocada hacia el centro del haz de polvo, un sistema de iluminación para permitir la visualización del haz de polvo se sitúa a 45° - 90° del camino óptico de la cámara. Se utiliza un objetivo zoom parafocal de 130 mm para conseguir visualizar correctamente las partículas. Para un encuadre correcto se utiliza un haz de línea, enfocado contra el chorro de polvo de manera que se este quede apuntando e iluminando únicamente el centro del haz tal como se indica en la figura. Tras esto se utiliza una iluminación de diodo de longitud de onda 405 nm esta luz que se encuentra en el limite del rango óptico tiene la ventaja de producir menos difracción que otro tipo de iluminación con lo que la cámara mostrará con mas nitidez la forma de las partículas. El tiempo de exposición de la cámara dependerá de la velocidad de las partículas y para los experimentos realizados este se mantiene constante a 50 microsegundos. Para correlacionar las imágenes con la señal de velocidad de los motores del alimentador de polvo se utiliza un a tarjeta de adquisición DAQ conectada al PC de la instalación Un software desarrollada a propósito del experimento sincroniza la extracción de datos de la cámara con la adquisición de la señal de los motores. Este configuración experimental permite contar las partículas de polvo según van pasando por delante de la cámara. El proceso de contado se describe en el capítulo 6 y a partir de esos datos de contado se determina el flujo

másico que se desea monitorizar. No obstante uno de los principales problemas de este tipo de sistemas es lo susceptibles que son a perturbaciones en la iluminación y la suciedad. El prototipo de sistema de imagen descrito aquí para la medición del flujo másico esta pensado con el propósito de monitorizar en condiciones adversas. El sistema consta con un filtro óptico paso banda en el 405 nm con un ancho de banda de ± 10 nm. Con este filtro y sistema de iluminación es posible aislar la recepción de la imagen de la mayor parte de radiación óptica existente en una instalación industrial. Permitiendo, por ejemplo, en el caso estudiado la medición del flujo de partículas durante el proceso de deposición.

Capítulo 5

Resultados experimentales

Las capas de WC – NiCr obtenidas mediante LMD, generalmente son utilizadas como recubrimiento superficial para aplicaciones de desgaste. Los composites resultantes tras deposición son susceptibles de padecer grietas, generalmente relacionadas con la excesiva fragilidad de la matriz ya que estas alcanzan una elevada dureza y se enfriará a gran velocidad durante el proceso.

5.1. Resultados previos

Estudios anteriores muestran que los composites WC-NiCr comerciales pueden alcanzar ratios de WC en torno al 60 % en peso lo que equivale a una fracción en volumen muy cercana al 40 %. [41] En estos mismos estudios previos realizados con compuestos comerciales se comprobó que la susceptibilidad a la fractura de estos es debida a la propia naturaleza de la matriz NiCr. En estas aleaciones las principales fases duras están formadas por boruros de Niquel y Cromo y pueden alcanzar durezas del orden de 700 HV(60HRC). Sin embargo estas fases son muy frágiles y son susceptibles de fractura cuando se someten al alto estrés térmico causado por los altos gradientes térmicos y altas velocidades de solidificación asociadas a los procesos láser. Mediante la deposición de diferentes polvos comerciales JM Amado et al. comprobaron que para un valor de 60 % de WC en peso es necesario un valor de Cromo por debajo del 8 % para obtener una dureza de la matriz lo suficientemente blanda, en torno a los 300 HV, además de un precalentamiento del sustrato

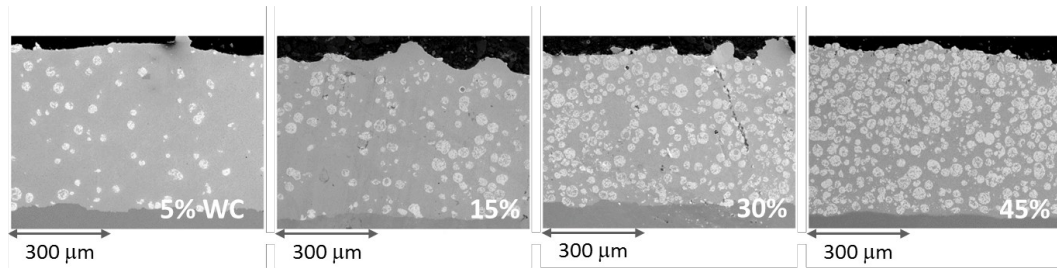


Figura 5.1: Micrografía mediante SEM de cordones con distinta composición nominal en peso de WC

a 400 °C para reducir las tensiones producidas durante el enfriado o no se puede garantizar un resultado libre de grietas [40].

5.2. Deposición de MMC de Ni-WC con composición homogénea

El primer paso para conseguir la fabricación de un FGM mediante LMD consiste en determinar las concentraciones nominales máximas y mínimas de la fase de refuerzo que es posible depositar, así como, los parámetros del proceso para que no aparezcan discontinuidades o defectos morfológicos en el cordón. Con este propósito se realiza un estudio de deposición de distintos MMC formados por el par Ni-CW variando parámetros de potencia, velocidad, tasa de aporte y composición. Basándose en la información obtenida en investigaciones previas [41] se escoge un compuesto comercial de NiCr con una dureza nominal de 300HV como el Deloro30 para la matriz, como fase de refuerzo se utiliza Woka 3030, el material de sustrato es C25. En este estudio se depositan muestras formadas por capas simples a diferentes concentraciones de carburo de Tungsteno, en particular 15 %, 30 %, 45 % y 60 % ratios de porcentaje en peso de este material. Se muestrea un rango amplio de parámetros y los valores óptimos para la deposición se encuentran alrededor de 2000 W de potencia laser, velocidades de avance de 20 mm/s y aportes de material de 35 mg/mm. Tras la deposición, las muestras son analizadas mediante SEM para

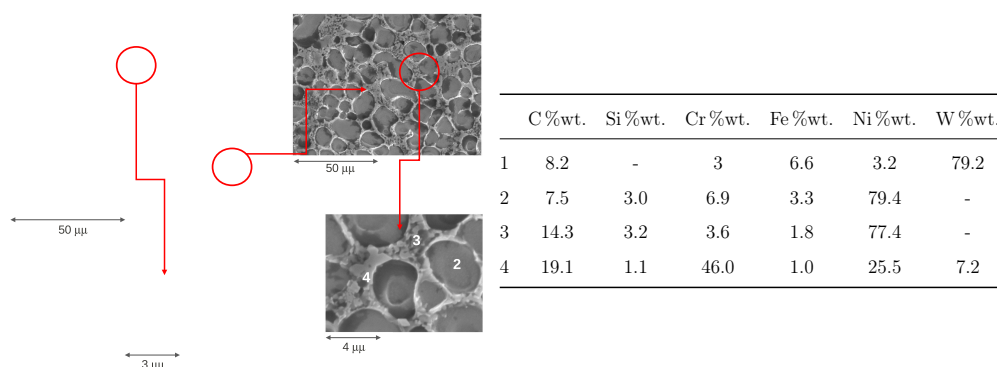


Figura 5.2: Micrografía mediante SEM. Detalle de las fases presentes en el material

obtener una imagen detallada de las fases presentes y permitir su identificación. Las micrografías mediante SEM que se pueden ver en la figura 5.1 corresponden a una concentración en peso de carburos de entre 5 % y 45 %. En la microestructura que muestra la matriz se puede destacar que los carburos cementados de las partículas de Woka retienen su forma esférica original tras el procesado y son claramente visibles en las imágenes, también se observa que en todos los casos la unión entre el carburo y la matriz es buena. En imágenes con mayor nivel de detalles (ver figura 5.2) se pueden identificar las fases. Hay cuatro fases principales, las partículas originales de carburo de Tungsteno, dendritas de gamma Ni, un eutéctico interdendrítico y carburos precipitados. La concentración en volumen de WC son estudiadas mediante análisis estereológico de las micrografías, se estudian los valores de concentración volumétrica tanto en microscopía óptica como en electrónica, los resultados obtenidos son compatibles con las concentraciones esperadas de carburos, ver figura 5.3. Se realiza también un estudio de dureza por microindentación sobre los cortes del material donde se realizó el análisis estereológico. El ensayo de dureza realizado muestra cierta dilución de la fase de WC hacia la matriz, los valores obtenidos para esta son 430, 500, 520 y 570 HV respectivamente para las concentraciones en peso de carburos 15 % 30 % 45 % y 60 % en todos los casos por encima de los valores nominales para de Deloro 300 HV. Las fases presentes en la microestructura del material observado también confirman estos resultados de dilución. En cuanto a la tendencia al agrietado, no fueron observadas grietas en ninguna de las capas con concentraciones en peso de carburo del 15 %, 30 % y 45 %, las capas con concentraciones de

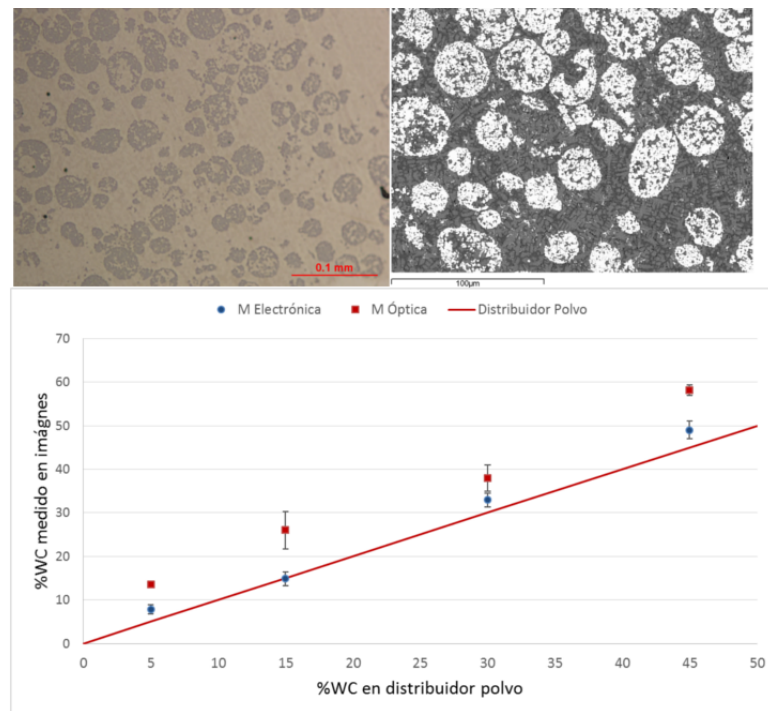


Figura 5.3: Micrografía mediante SEM análisis estereológico de proporción de carburos

carburos del 60 % sin embargo desarrollaron grietas. La primera inspección del proceso demuestra al igual que otros estudios previos [39] que las composiciones finales del material depositado concuerdan consistentemente con los valores de la mezcla nominales programados para el alimentador, lo que posibilita la fabricación de gradientes. También se observa cierta flexibilidad del material a aceptar estas distintas concentraciones manteniendo el valor de los parámetros, lo que es una buena noticia para el proceso de fabricación de gradientes y nos evita tener que introducir un control multiparamétrico cuando se realicen cordones de composición heterogénea. Con estos parámetros la deposición de WC máxima rondará el 45 % en peso si no se utiliza precalentamiento, sin embargo la introducción de capas de composición intermedias entre el sustrato y la composición buscada puede reducir la necesidad de este precalentamiento. Este es el caso más natural en los procesos de prototipado de FGM ya que las capas inmediatas al sustrato pueden ser descartadas en la pieza final.

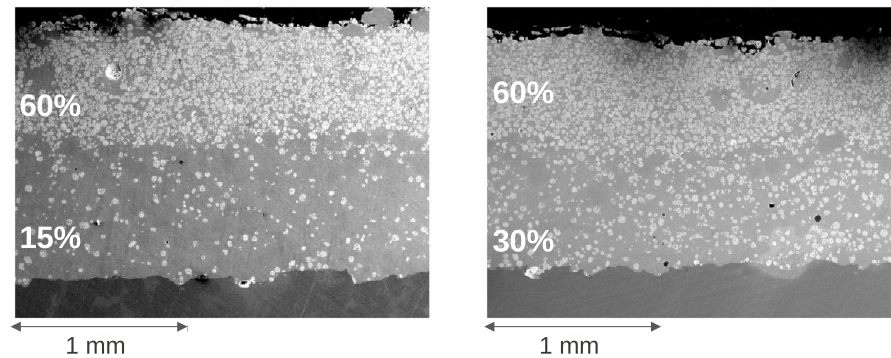


Figura 5.4: Metalografías obtenidas mediante SEM de la superposición de capas de distinta concentración

5.2.1. Superposición de capas de composición homogénea

En el apartado anterior se menciona la introducción de capas de composición intermedias entre el substrato y la capa con composición máxima de carburos para reducir la susceptibilidad del agrietado. Este es el propósito final de un material con gradiente funcional. Para estudiar este punto es necesario realizar pruebas preliminares de diferentes conjuntos de capas con distintos gradientes. El objetivo es doble en este conjunto de experimentos ya que además del problema de las grietas se puede observar la transición que se produce entre distintas composiciones dentro del material. El estudio de este tipo de transiciones entre capas es un requisito en la estrategia de fabricación de piezas con gradiente discutida en el capítulo 2. Los experimentos se realizan depositando recubrimientos formados a partir de dos capas superpuestas, una interior y otra superficial, todas las capas son depositadas con los mismos parámetros del proceso. La capa exterior en todos los casos se realiza con una concentración del 60 %wt. de WC mientras se varían los valores de concentración de la capa interior inmediata al substrato (ver figura 5.4). Los valores de concentración utilizados son 15 % 30 % y 45 % de WC. Los materiales utilizados son Woka 3030 y Deloro30, los parámetros de deposición utilizados son los mismos que en el apartado anterior. Tras los experimentos, los análisis realizados sobre los recubrimientos depositados muestran la presencia de grietas para las composiciones de 30 % y 45 % de WC en la capa interior, y los recubrimientos con 15 % de WC no presentan grieta alguna. Esto indica la posibilidad de recubrimientos de en-

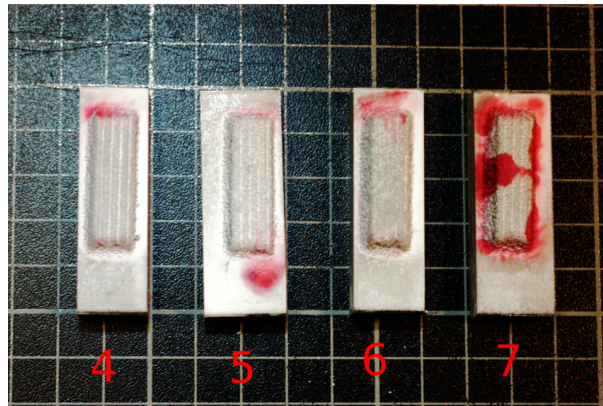


Figura 5.5: Muestras obtenidas de la superposición de capas de distinta concentración, resultado de la prueba de líquidos penetrantes

endurecimiento superficial con altas concentraciones de WC incluso sin procesos de precalentamiento mediante una estructura de capas graduadas. Los resultados de la microestructura pueden observarse en las figuras siguientes. Los resultados son un éxito relativo, la posibilidad de obtener un recubrimiento con alto contenido de carburo de Tungsteno es posible, no obstante estos resultados son insuficientes para la generación de un gradiente arbitrario donde las concentraciones en contacto pueden mostrar mucha más variabilidad. Para incrementar este rango de posibles concentraciones se plantea un barrido más extenso de composiciones incrementando a su vez el número de capas. Para tener una mayor variedad de datos se realizan pruebas sobre A316 esta vez con menor potencia y velocidad, 1250 W y 10 mm/s. Estas pruebas se realizan superponiendo capas de 5 cordones, el número de capas se incrementa en cada nueva muestra variando la concentración entre 0 y 60 % de Woka. A medida que los gradientes se hacen con mayor número de capas el cambio de composición se realiza de manera más moderada repartiendo el cambio de composición entre las distintas capas. En las pruebas se invierte el orden de las capas para demostrar que ambos gradientes son posibles. Para este experimento las deposiciones se hacen en condiciones de menor energía, resulta plausible que en tales condiciones los gradientes puedan ser depositados con más facilidad debido a la menor amplitud del ciclo térmico que evite la aparición de grietas. La posible pérdida de dilución en la interfase con el sustrato no es un problema tan relevante para la fabricación ya que las primeras capas depositadas pueden ser desechadas y la unión

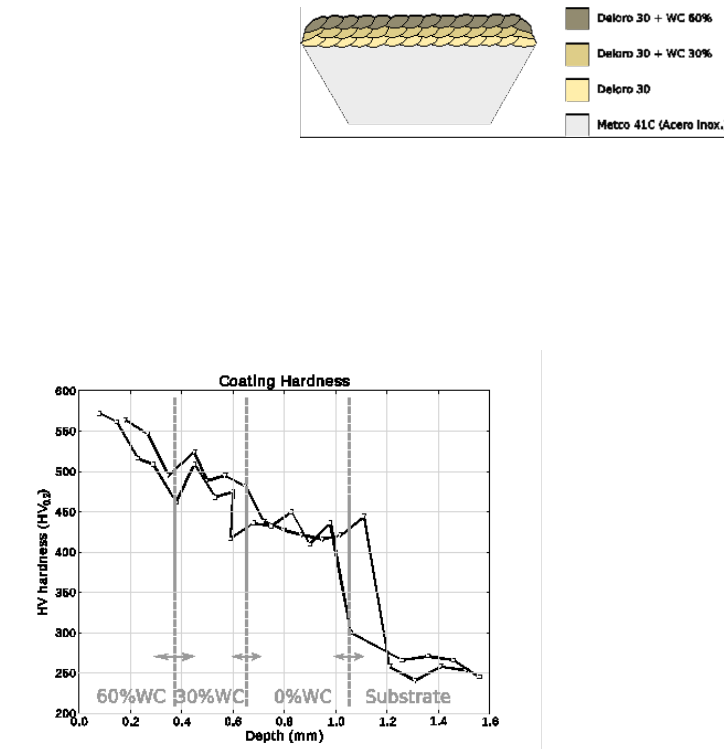


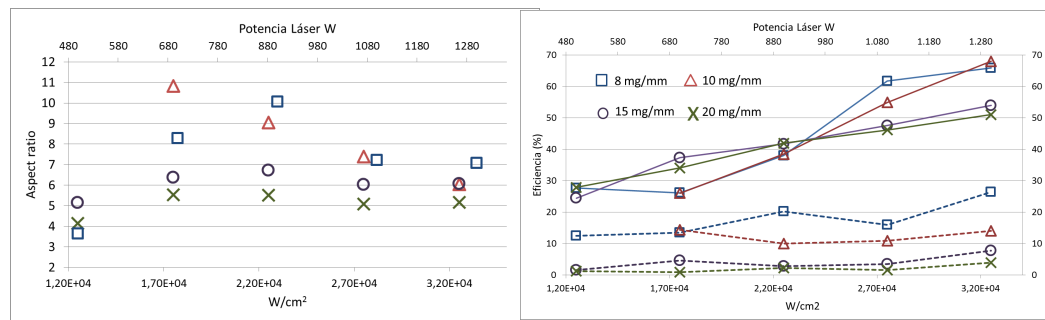
Figura 5.6: Cabeza de una pala para una amasadora fabricada con LMD a escala 1/2, metalografía del recubrimiento con gradiente funcional

sobre el mismo material base una vez superada la primera capa es naturalmente más fuerte. Esto nos abre una nueva ventana de posibilidades parámetros para la fabricación, no recomendable para la generación de recubrimientos, pero factibles en el caso de un FGM. Los resultados muestran que hasta la cuarta capa se puede cambiar la composición sin problemas (ver figura 5.5). A partir de 4 capas aparecen grietas lo que puede indicar un error en los parámetros o una incompatibilidad del material. El problema parece estar en colocar una capa de más 40 % de Woca sobre una de 60 %, este problema podría implicar que un 60 % de Woca es una concentración demasiado elevada para realizar gradientes arbitrarios. Sin embargo se puede utilizar este 60 % de Woca cuando esta es la última composición que se deposita en la pieza o la diferencia entre las composiciones de las capas superpuestas es lo suficientemente grande. Finalmente, para realizar una simulación de la fabricación de un FGM en un caso real se realizan una serie de muestras para reproducir la pala de una amasadora de cemento a una escala de laboratorio apropiada. La cabeza de

la pala se construye en un primer paso utilizando acero inoxidable y en un segundo paso, esta pieza depositada se utiliza como sustrato para construir un recubrimiento protector de la superficie de contacto. En la pieza original este recubrimiento está formado por carburo de Tungsteno sinterizado unido por brazing y en la pieza generada en el laboratorio está formado por un recubrimiento con gradiente funcional. El recubrimiento se realiza con 3 capas con diferentes cantidades de WC. Las piezas antes y después del proceso se muestran en la figura 5.6. Todo el proceso se repite dos veces, las piezas resultantes son sometidas a análisis metalográfico, una de las piezas se corta transversal y longitudinalmente para comprobar el estado del material del bloque fabricado y del recubrimiento. El resultado de la parte de acero es denso y sin grietas o porosidad notable. El recubrimiento que se puede ver en la figura no muestra porosidad y tiene las composiciones nominales buscadas en el diseño. El análisis estereológico realizado sobre los cortes del recubrimiento muestra que las concentraciones de carburos coinciden exactamente con las buscadas.

5.3. Deposición de MMC con gradientes continuos de Ni-WC

La deposición de cordones con un cambio de composición continuo requiere de un control preciso del alimentador de polvo; para conseguirlo el alimentador debe ser caracterizado, esto como se ha explicado en el capítulo 2, consiste en determinar la tasa de cambio de composición y el retraso del controlador para cada uno de los materiales en polvo usados. La primera parte del trabajo experimental consistirá en determinar con exactitud estos parámetros. La segunda parte, consistirá en validar si el uso de los valores obtenidos para estos parámetros, produce el efecto deseado sobre los materiales depositados. Para la validación se propone la deposición de diferentes cordones, generando un gradiente de composición en los mismos mediante la variación de las señales del alimentador durante el proceso. El análisis metalográfico posterior de los resultados y la monitorización de la emisión electromagnética del baño fundido permitirán determinar la posición del gradiente dentro del material.



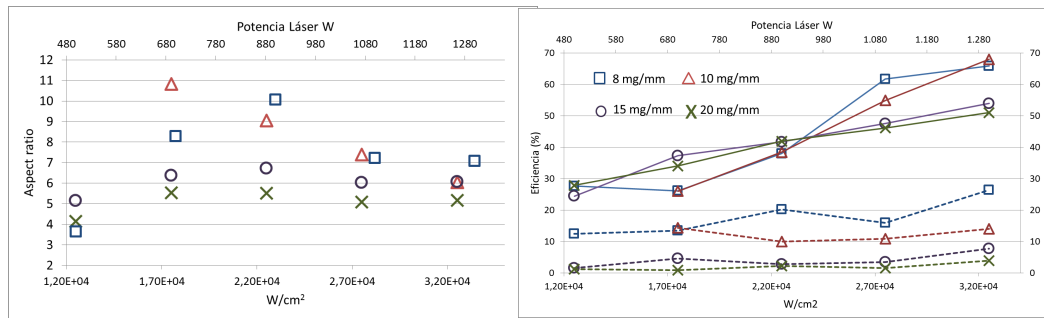
(a) Relación de aspecto de las secciones del cordón
(b) Porcentaje de dilución del cordón en el sustrato

Figura 5.7: Gráficas correspondientes a los resultados del estudio paramétrico de morfología del cordón para Deloro30

5.3.1. Optimización de parámetros

La fabricación aditiva con LMD requiere además de la capacidad de depositar el material sin discontinuidades, ser capaz de depositar capas extensas de espesor controlable. Para ello es necesario asegurar que las características del cordón depositado como son, la dilución, la relación de aspecto y la eficiencia permanecen constantes durante el proceso. En el apartado anterior se obtuvieron valores de referencia para las concentraciones máximas y mínimas que es posible obtener, así como, una ventana de posibles valores para la potencia, velocidad, etc. En este estudio se pretenden conseguir unos parámetros que permitan realizar cordones que muestren un resultado uniforme aunque se utilicen distintas concentraciones de carburos en su deposición. Cuando se realizan cordones con cambio de composición el material depositado es susceptible de sufrir cambios de densidad, lo que afecta a la morfología del cordón y puede causar problemas en la superposición de capas durante la fabricación de una pieza. Para estos casos tal y como se explica en el capítulo 3 las tasas de deposición se pueden determinar en función de la masa o el volumen. Obteniendo cordones de composición heterogénea que conservan la masa depositada por milímetro o la sección, sin embargo esto requiere ajustar los parámetros del proceso adecuadamente para mantener estos valores constantes dado que el cambio de composición puede afectar a la eficiencia produciendo un cambio de la masa depositada o de la densidad produciendo un cambio en la sección del cordón.

Para conseguir resultados donde los cordones muestren una morfología controlable se realizan dos baterías de ensayos, uno para determinar los valores óptimos para cordones individuales y otra para determinar los valores de solape más adecuados para la fabricación. Los ensayos se organizan de la siguiente manera; se realizan dos bloques de muestras para cada uno de los experimentos, en las cuales se repiten las mismas pruebas cambiando los parámetros de la máquina en cada proceso de deposición. Las pruebas se llevan a cabo para las composiciones límite estudiadas, 0 %wt. WC y 60 %wt. WC, las composiciones intermedias deberían mostrar un comportamiento compatible con los resultados de uno u otro extremo, acorde a lo observado en las pruebas previas de deposición de cordones con composición homogénea. En la deposición de cordones simples las pruebas se realizan a 20mm/s de velocidad de escaneo, se muestrea la potencia, el aporte de masa y el ancho del foco con la intención de encontrar una ventana de parámetros que tenga valores de eficiencia, dilución y relación de aspecto del cordón adecuadas. Las potencias se varían entre 700 y 2200 W, se utilizan dos diámetros de spot 2 y 2.7 mm y una tasa de aporte entre 15 y 30 mg/mm. Los resultados se presentan en las figuras 5.7. En una de ellas se puede ver la distribución de relaciones de aspecto y en la otra la eficiencia contra la dilución para los cordones de Deloro30 puro y un ancho del spot de 2 mm. Los parámetros óptimos están destacados en rojo en las figuras. Los resultados nos indican que los parámetros más favorables son en torno a los valores velocidad 20 mm/s potencia entre 1300 y 1400 W y tasa de aporte 10 mg/mm. En las pruebas con WC 60 %wt. se descarta el uso de un spot del 2.7 mm dado que no es viable para el Deloro30 y no es posible ni recomendable cambiar el ancho del cordón durante la deposición de una pieza con múltiples composiciones de cordón. La ventana de parámetros estudiada para una concentración de WC de 60 %wt. es 20 mm/s de velocidad del posicionador, tamaño del spot 2 mm, potencia entre 500 a 1300 W y tasas de aporte de material entre 8 y 20 mg/mm. Las tasas de 30 mg/mm fueron descartadas para un foco pequeño de 2 mm en las pruebas para el Deloro30. Los resultados pueden verse en la figura 5.8. análogas a las del Deloro30. Los parámetros óptimos encontrados son: los valores velocidad 20 mm/s potencia 700 W y tasa de aporte 10 mg/mm. Para el segundo ensayo consistente en la generación de capas se



(a) Relación de aspecto de las secciones del cordón (b) Porcentaje de dilución del cordón en el sustrato

Figura 5.8: Gráficas correspondientes a los resultados del estudio paramétrico de morfología del cordón para Woka

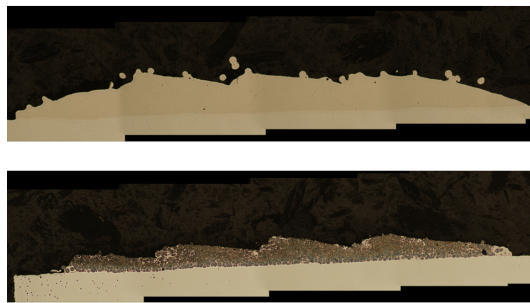


Figura 5.9: Corte transversal de una capa. Resultados del estudio del solape con los parámetros óptimos

parte de los parámetros obtenidos en el ensayo anterior, el principal propósito de esta prueba es determinar el desplazamiento del spot del láser entre cordones o el porcentaje de solape. El ensayo consiste en depositar diversas capas con cuatro cordones solapados y probar distintas distancias de solape y potencias. Las potencias deben ser ajustadas ligeramente sobre los resultados de los cordones individuales ya que la acumulación de calor y el cambio en la superficie pueden alterar los valores óptimos. Las pruebas una vez más se repiten para las dos distintas composiciones límite 0 %wt. WC y 60 %wt. WC. Los parámetros se varían entre 1300-1400 W para e Deloro y 700 y 900 para las capas con WC. Los solapes utilizados utilizan los valores de 45 % 40 % 35 % respecto al ancho del spot. Las micrografías de los resultados obtenidos pueden observarse en las figuras 5.9. Los valores de solape aceptados son

del 40 %. Los resultados muestran una capa continua sin porosidad ni grietas, tanto para el Deloro como para la capa de Woka y nos proporcionan los parámetros para la fabricación de gradientes y capas superpuestas. Finalmente los cortes metalográficos de los cordones obtenidos en el primer ensayo con concentraciones de 0 %wt. y 60 %wt. WC son inspeccionadas mediante análisis de imagen para medir las relaciones de área y peso obtenidos por el material. El objetivo es estimar la densidad de la muestra con respecto a los valores nominales del material. De esta manera se puede establecer la relación entre la fracción en volumen WC observada y la relación en peso de la muestras para calibrar las medidas estereológicas en la determinación de la concentración de WC en los gradientes. Los valores hallados en las relaciones de área y peso coinciden con los valores nominales para los materiales seleccionados, garantizando la fiabilidad de los ratios en peso provenientes del análisis estereológico de fracción en volumen.

5.3.2. Efecto del cambio de la composición sobre los parámetros del proceso

De los estudios de optimización de parámetros realizados sobre capas y cordones para las composiciones 60 %wt. WC 0 %wt. WC se pueden compilar datos para mostrar el efecto de la cantidad de carburo sobre los cordones depositados en función de los parámetros de deposición. A tal efecto se realiza la figura 5.10 donde en función de la potencia del láser se representan distintas características del cordón depositado. A la izquierda, en la figura, se observa la eficiencia y la dilución para cada una de las composiciones, estas son superiores para los cordones con alto contenido en carburo. Basándose en esto es de esperar que los cordones con mayor cantidad de carburos tengan una zona afectada térmicamente mayor y mayor anchura. En la figura de la derecha se presenta la altura y anchura del cordón en función de la potencia. La anchura del cordón, representada por la línea continua, oscila en torno a los dos milímetros y es superior cuando la concentración de carburos es mayor, de acuerdo a lo esperado. Este efecto tiene una consecuencia al generar cordones con cambio de composición continuo; A medida que la concentración de carburos cambia, al avanzar el posicionador, el área del cordón debe cambiar y eso afecta a la señal de

Figura 5.10: Efecto de la composición en las características del cordón

emisión óptica recibida en el sensor de temperatura instalado en el cabezal. Esto significa que durante el proceso se debería poder observar el cambio de composición en el sensor de temperatura siempre y cuando no se reduzcan perturbaciones de la señal debidas a otros factores. Para compensar este cambio de área la solución puede pasar por la reducción de la potencia cuando se produce el aumento en la cantidad de carburos

5.3.3. Limitaciones y calibración del sistema

Uno de los primeros resultados necesarios si se desea una variación gradual de composición en un sólido, es determinar el límite de la variación de concentración punto a punto. Este límite de variación es dependiente de la aceleración del disco y esta aceleración debe ser medida. En la instalación utilizada la señal de velocidad de los motores está conectada a la tarjeta de adquisición del PC tal como se indica en el diagrama de configuración experimental en el capítulo 4. Para la determinación de esta aceleración simplemente se somete al alimentador de polvo a un step test.

Los resultados para ambos motores se pueden ver en la figura 5.11. La rampa que se observa en la figura a es debida a un circuito integrador que se halla a la entrada del PI que controla el motor. Las aceleraciones máximas que el sistema puede suministrar para cada tolva son de 10.9 %/s y 13.6 %/s. Para determinar las curvas del cambio de composición máximo posibles, hay que cruzar estos resultados con los valores de calibración de los distintos polvos. Los resultados se expresan en función de si se desea un volumen constante o masa constante a lo largo del proceso

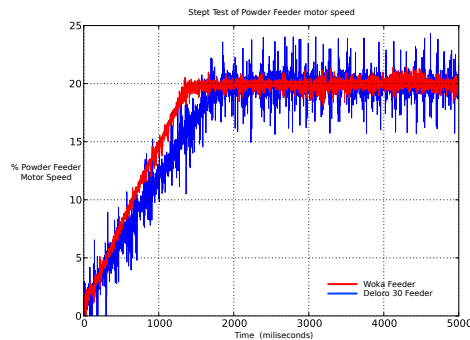
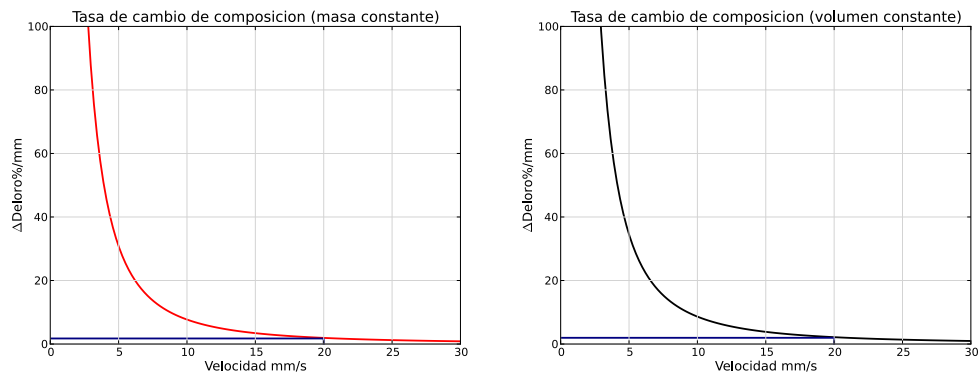


Figura 5.11: Gráfica de la respuesta de los motores a un ensayo de salto



(a) Deposición con cambio de composición y masa constante
(b) Deposición con cambio de composición y volumen constante

Figura 5.12: Gráficas de la tasa de cambio de composición posible contra velocidad

de deposición; los resultados pueden verse en la figuras 5.12, en el caso del volumen constante los datos están basados en densidades medias típicas de los materiales utilizados y no en medidas experimentales.

5.3.4. Determinación del retraso del polvo

El valor del retraso del polvo viene determinado por la velocidad del flujo del polvo a través del sistema neumático hasta el cabezal del robot. Hasta ahora todos los datos que se han expuesto sirven para determinar el flujo de polvo en la abertura de salida del alimentador suponiendo que el disco del alimentador consiga una relación lineal entre velocidad de giro y masa transportada fuera de los puntos de

estabilidad. La última parte consiste en determinar cuanto tarda una perturbación en el flujo másico en tener su efecto en la boquilla del cabezal. La variabilidad en la posible configuración de la instalación neumática así como la gran variabilidad en los tipos de partícula transportado hace poco viable un estudio teórico detallado del problema del transporte de flujo que aportase alguna información útil. Es más en la instalación de prueba a menudo se cambia la posición de los elementos del sistema neumático así como las dimensiones de algunos de los elementos. No parece asequible entrar a valorar las perturbaciones inducidas por el cambio en la pérdida de carga de los conductos al variar su configuración en el espacio a consecuencia de un movimiento o giro del robot, posiblemente sean despreciables. Para confirmar o negar la existencia de perturbaciones y el tiempo en que el polvo tarda en llegar se realiza un experimento de análisis de imagen. Este experimento se realiza utilizando la configuración experimental descrita en el capítulo 4. El controlador genera un cambio de composición brusco en la velocidad del disco del alimentador, un pico de velocidad, en el flujo de polvo se observa ese pico un tiempo más tarde. Un ejemplo de los datos obtenidos se puede observar en la figura 5.13. En las pruebas se ha medido el retraso temporal varias veces cambiando la configuración del sistema neumático para varias posiciones del robot así como para distintas cantidades de flujo dentro de los valores nominales que se utilizan en la generación de gradientes. No se ha podido detectar una influencia significativa de ninguno de esos parámetros sobre la velocidad del polvo. Los resultados de las pruebas para los distintos materiales pueden verse en la tabla 5.1. Los tiempos de retraso son consistentes para los materiales y sus respectivos circuitos de transporte ya sea provenientes del contenedor A o el B. Se observa una destacable dependencia del tamaño de partícula en la velocidad, observable en las velocidades de los polvos de carburo de Tungsteno, lo que concuerda con lo que se espera de un flujo multifásico. Es importante añadir que el factor más influyente en el tiempo de retraso es, sin embargo, el caudal de gas utilizado en el circuito de transporte.

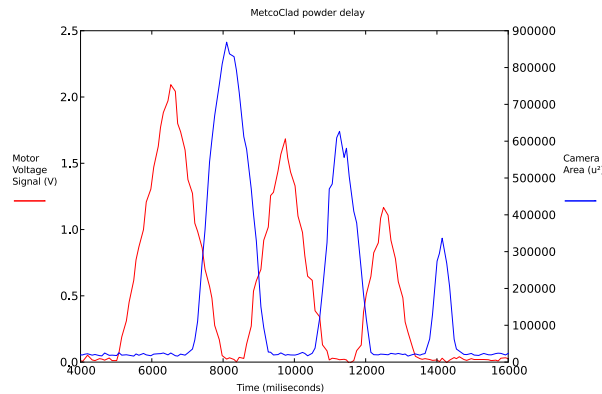


Figura 5.13: Efecto del retraso del polvo reflejado en la señal de la cámara y el motor

	Retraso (ms)	Tamaño partícula (μ)	Circuito
Woka 3030	1351 ms	-45+11	Tolva A
MetcoClad 52001	1593 ms	-106+45	Tolva A
Metco12C	1695 ms	-125+53	Tolva B
Deloro30	1697 ms	-125+45	Tolva B

Tabla 5.1: Tabla con los valores de retraso obtenido con respecto a la tolva utilizada y el tamaño de partícula

5.3.5. Validación del proceso: análisis de la señal del baño fundido

Para validar y comprobar que el proceso de deposición propuesto para materiales con gradiente NiCr - WC continuo se puede realizar correctamente se han realizado diferentes pruebas de generación de cordones con diversos cambios de composición. La configuración experimental utilizada fue desarrollada en el capítulo 4. Los primeros experimentos que se realizan se validan mediante la comparación de las señales de los motores del alimentador de polvo y las señal del proceso obtenida del fotodiodo instalado en el cabezal que se presenta en diferentes figuras. Cada una de estas gráficas contienen los valores obtenidos por los sensores a lo largo del proceso. Para cada uno de los cordones realizados obtenemos un gráfico donde se nos muestra los valores de velocidad de cada uno de los motores de alimentador de polvo (líneas

Figura 1	
Longitud	30 mm ms
Velocidad	10 mm/s ms
Potencia	1250 ms
Altura de foco	20 mg/mm ms
Tasa de deposición	25mg/mm
Concentración inicial	100 % Deloro30 ms
Concentración final	60 % Deloro30 40 % Woka
Gradiente: Woka %/mm sobre Deloro30:	+2 %/mm

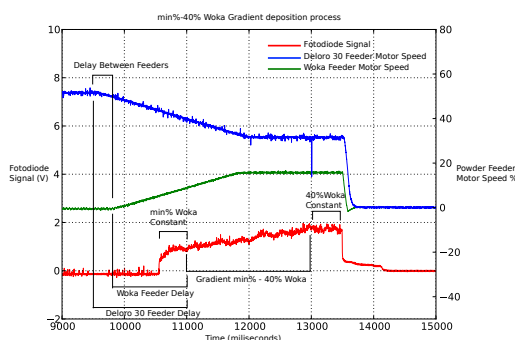


Figura 5.14: Gráfica de la respuesta de los sensores durante la deposición con tasa de cambio 2 %/mm Woka

verde y azul) junto a la señal del fotodiodo que mide la luz proveniente del proceso y nos da una medida de la temperatura y el tamaño del baño fundido. Las pruebas realizadas pueden verse en las figuras 5.14 5.15. En todas las pruebas que muestran gradiente se observa un cambio en la señal del fotodiodo a lo largo del proceso, este cambio solo se observa en las partes de la prueba en las que se realiza gradiente.

Esta correlación entre el gradiente y la señal del fotodiodo al cambiar la composición del material coincide con el cambio predicho cuando se estudiaron los parámetros de deposición. El cambio de las características ópticas, térmicas y metalúrgicas del material producen un cambio de la eficiencia y el área fundida (figura 5.10). La señal producida por el fotodiodo es sensible a estos cambios y muestra un aumento o disminución concordante con el cambio de composición. El punto más notable es que en las figuras (ver figura 5.14) la posición en la que se inicia la rampa de temperatura durante la deposición, coincide exactamente con el valor esperado según la medición de los retrasos. En las distintas pruebas se utilizan distintos materiales, pero los resultados son similares en todos los casos. En las pruebas de las figura

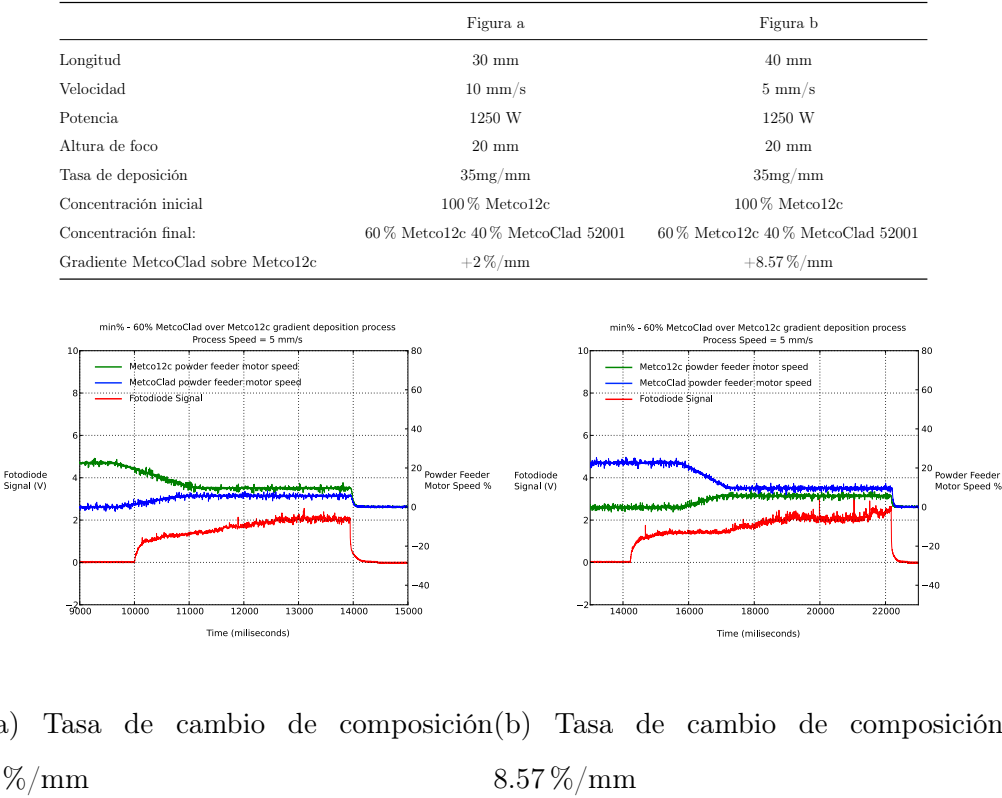


Figura 5.15: Gráfica de la respuesta de los sensores durante la deposición MetcoClad sobre Metco12c

5.15 (a) se utiliza un cambio de concentración de un 2 % por milímetro, según lo propuesto un cambio de 4 veces esta cantidad es posible reduciendo la velocidad a la mitad, los resultados de esta prueba pueden observarse en la figura 5.15 (b), donde se muestra una tasa de cambio compatible con un valor de 8 % por milímetro perfectamente localizada en la mitad del cordón.

5.3.6. Validación del proceso: análisis estereológico

Los resultados preliminares muestran un posicionamiento exacto del gradiente en el conjunto del material depositado, pero dejan dudas sobre las tasa de composición. Para reducir esta incertidumbre se depositan más muestras de cordones con cambio de composición utilizando los materiales Deloro30 y Woka 3030, los cordones se plantean para un cambio de composición más suave 1.5 % por milímetro donde el análisis estereológico es más fiable. Las pruebas se acompañan de un análisis de EDS de la composición de la matriz para contrastar las medidas estereológicas. Los

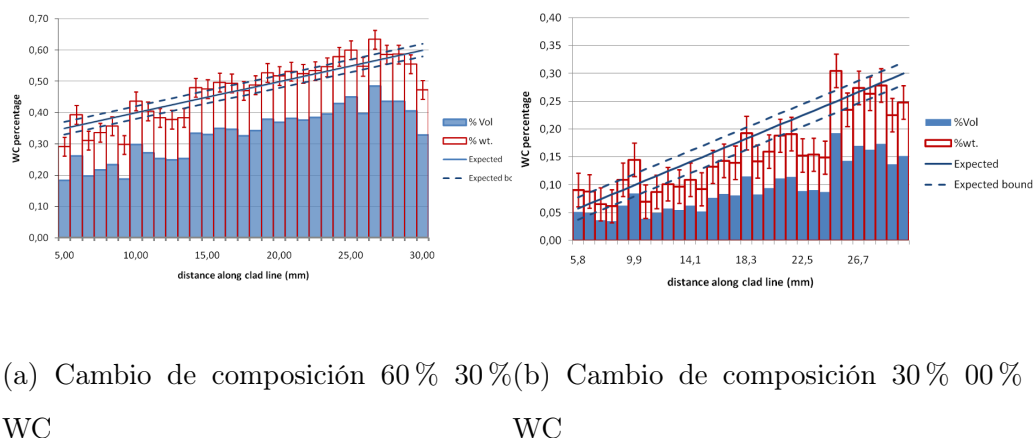
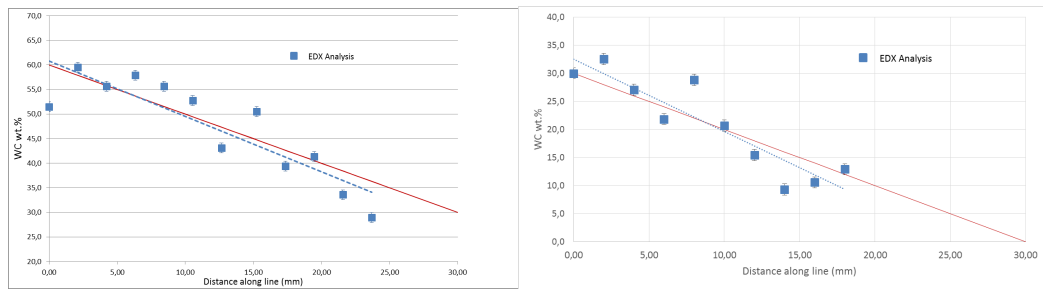


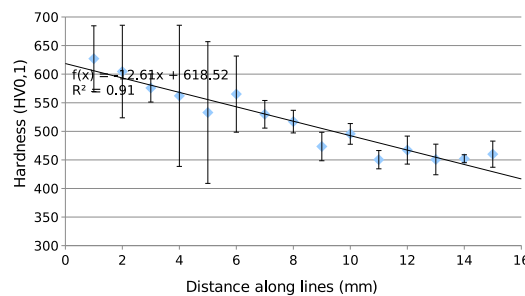
Figura 5.16: Gráficas con las mediciones de composición a lo largo de dos cordones

parámetros utilizados están optimizados para la deposición de capas, acorde con los resultados obtenidos en el primer apartado del capítulo. Los resultados preliminares muestran un posicionamiento exacto del gradiente en el conjunto del material depositado, pero dejan dudas sobre las tasa de composición. Para reducir esta incertidumbre se depositan con más cuidado cordones con cambio de composición utilizando los materiales Deloro30 y Woka 3030, los cordones se plantean para un cambio de composición más suave 1.5 % por milímetro donde el análisis estereológico es más fiable. Las pruebas se acompañan de un análisis de EDS de la composición de la matriz para contrastar las medidas estereológicas. Los parámetros utilizados están optimizados para la deposición de capas, acorde con los resultados obtenidos en el primer apartado del capítulo.

Los resultados del análisis estereológico para los cordones se muestran en la figura 5.16. Se puede comprobar como los cambios de composición son precisos en ambos casos y una pendiente lineal entre la composición mínima y máxima de WC se obtiene con fiabilidad. Los estudios de EDS se presentan a continuación en la figura 5.17, aquí la relación porcentual entre los marcadores de Tungsteno y Niquel muestra una correlación entre la concentración de WC y la presencia de los elementos en la matriz. Tal y como fue observado en la microestructura de las pruebas preliminares, aparece una mayor cantidad de carburos precipitados y diluidos en la matriz cuanto mayor es la concentración de carburo de Tungsteno, haciendo patente el cambio de



(a) Cambio de composición 60 % 30 % WC (b) Cambio de composición 30 % 00 % WC



(c) Efecto en la dureza del cambio de composición

Figura 5.17: Cambio de composición observado mediante EDX en los cordones y su efecto en la dureza

composición.

La dilución de los carburos en la matriz es un hecho comprobado tanto en los análisis de la microestructura como en las pruebas de EDS así como en los estudios de dureza que realizaron para los gradientes generados mediante la deposición de capas homogéneas. En los gradientes generados de manera continua este cambio de dureza se ve reflejado conjuntamente con el cambio de composición, los resultados de un ensayo de microindentación a lo largo de un corte longitudinal pueden verse en la figura 5.17. En las figuras se representan los datos de tales ensayos en conjunto con los análisis de EDS y estereológico.

5.3.7. Efectos del cambio del composición sobre el material

Como se explica en el capítulo 2 y como se observa en los ensayos realizados para caracterizar los cordones, la composición en el material de aporte tiene un importante

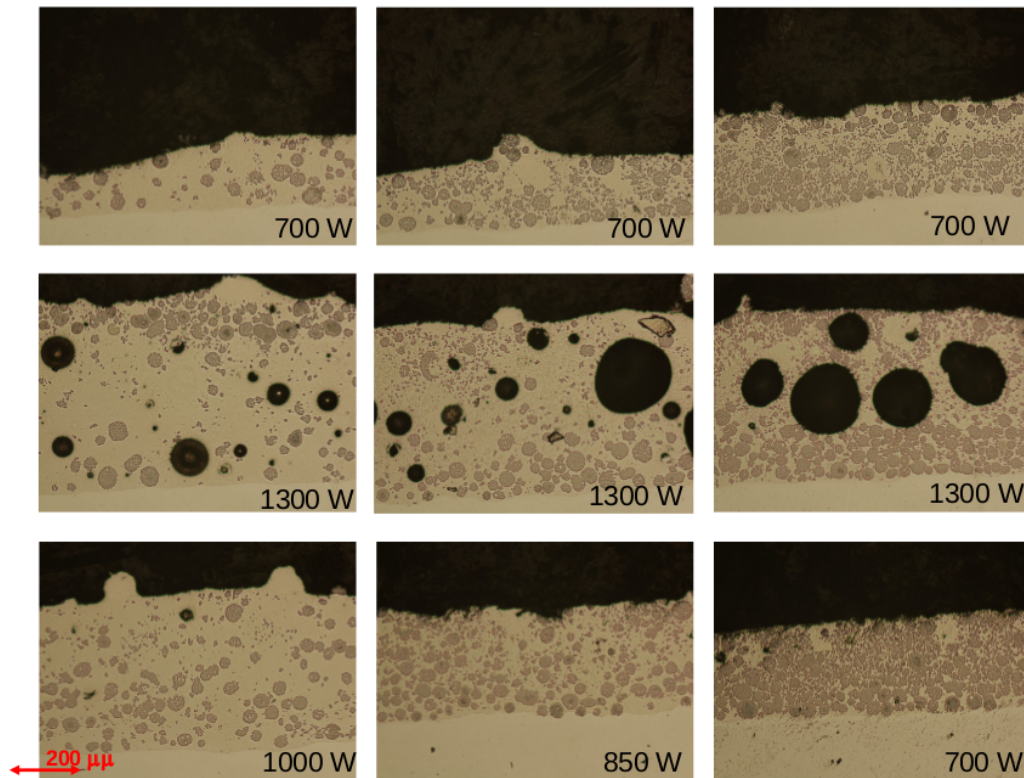


Figura 5.18: Efecto del cambio de composición 30 %wt-60 %wt sobre el cordón con diferentes potencias

efecto sobre los parámetros del proceso, dado que en última instancia se trata del proceso de deposición de materiales distintos. Para los cordones de composición heterogénea se observan los siguientes efectos dependientes de la concentración de WC. Con los parámetros óptimos para el WC la dilución y la eficiencia son pequeñas en las áreas de concentración baja y el cordón adquiere dimensiones aceptables cuando alcanza la concentración de carburos adecuada 60 % en peso (ver figura 5.18). Con los parámetros óptimos para una deposición correcta de Deloro30 (0 % WC), la dilución y la eficiencia son buenas pero la carga térmica es demasiado alta para los carburos que se disuelven en la matriz o generan poros en el material, incluso para concentraciones de carburos pequeñas menores al 30 % la porosidad se vuelve inadmisible (ver figura 5.18). Con estos resultados la alternativa es variar la potencia a la vez que se varia la concentración del carburo interpolando linealmente entre los valores utilizados para las concentraciones de 60 % de carburo y 0 %. En el resultado, (ver figura 5.19), la mejora es evidente, la porosidad se reduce considerablemente y la

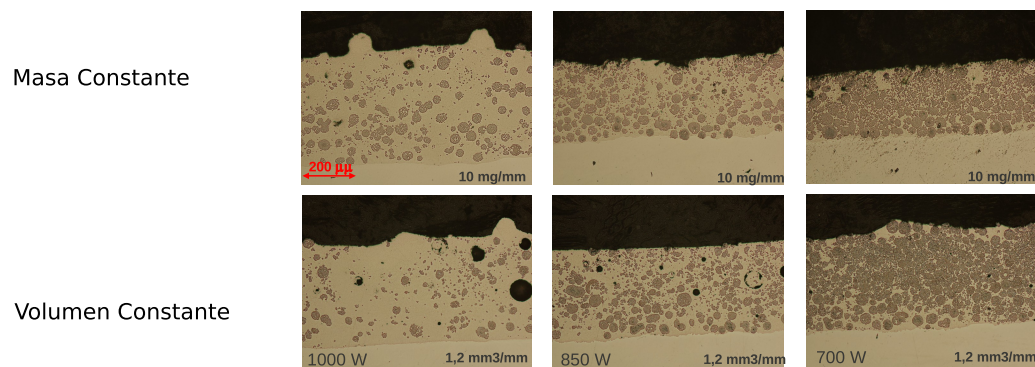


Figura 5.19: Cortes de los cordones con cambio de composición 30 %wt-60 %wt con variación de potencia

dilución muestra valores más consistentes. Si las muestras se realizan con parámetros de alimentador para obtener una tasa de masa constante se observa que la altura del cordón se reduce por el cambio de densidad. Si se realizan para mantener la tasa volumétrica las dimensiones del cordón aparecen mucho más uniformes.

Capítulo 6

Respuesta dinámica del flujo másico

En los capítulos precedentes se ha estudiado la determinación de los parámetros del proceso de deposición para la obtención de una tasa de cambio de composición dada en el material depositado, partiendo de las características del sistema de alimentación, sin embargo, la introducción de un gradiente de composición en un material a partir de una función de distribución arbitraria mediante la deposición de cordones de composición heterogénea, requiere de un control del flujo de polvo capaz de seguir con precisión distintos cambios de composición definido a lo largo del tiempo. Esto implica obtener tasas de cambio de flujo de polvo variables y arbitrarias. Los intentos de variación rápida de la tasa de flujo másico, sobre todo cerca de los límites de actuación del alimentador, tendrán efectos impredecibles sobre el flujo real, lo que producirá tasas de cambio diferentes a las nominales debido al efecto de la respuesta transitoria del sistema a los cambio de la señal de entrada.

En un proceso de deposición de metales por láser, el flujo de polvo se focaliza sobre un punto de la superficie del sustrato mediante el uso de una tobera que dirige el gas que transporta el polvo. El tipo de flujo es considerado como de fase sólida diluída y las partículas de polvo tienden a tener una distribución y velocidad similares a las del gas que las transporta. No se considera de relevancia la interacción entre las partículas de polvo, no existen métodos estandarizados de medir el flujo de masa que llega a la boquilla [37] y en general no hay investigados muchas soluciones aptas para este tipo de monitorización [42] [43]. El flujo de masa en el baño fundido depende de la distribución de concentración de polvo al llegar al foco del

haz [44] [45] y ningún método de medición que pueda alterar la estructura del haz es aceptable. De entre los métodos restantes solo aquellos en los que se pueda obtener una alta frecuencia de monitorización son válidos, ya que necesitamos conocer como el flujo de masa varia con el tiempo.

Determinar la tasa de cambio producida por la respuesta de los actuadores del alimentador de polvo a una señal dada en estas condiciones no es inmediato ni sencillo [46]. El flujo másico no puede ser medido directamente, además una medida de la tasa de cambio requiere una monitorización continua en el tiempo del flujo másico.

La medición continua del flujo másico en un fluido multifásico es un problema habitual muy estudiado en la industria donde se requiere el uso del transporte neumático de distintos materiales [47].

En estas situaciones, la solución más indicada es el uso de sistemas de medición basados en atenuación o dispersión óptica mencionados por [48] y utilizados en distintas investigaciones [49] [50].

Sin embargo estos sistemas poseen numerosos inconvenientes, como pueden ser: baja relación señal ruido a flujos másicos pequeños, baja frecuencia de muestreo o un alto grado de dependencia entre las mediciones. Además, tienen problemas con distribuciones cambiantes y no uniformes de partículas, como las que se observan en los haces de polvo estudiado en los procesos de cladding. Finalmente, en algunos casos, son necesarias el uso de receptáculos o cámaras cerradas para aislar los dispositivos de la contaminación [51], lo que no es posible en estos casos donde los jets de polvo generados han de fluir libremente.

Recientemente, en el estudio del transporte neumático de sólidos, se han propuesto nuevas metodologías basadas en la adquisición de imágenes para determinar el valor del flujo másico. Como ejemplos de estos métodos se pueden mencionar los estudios de [52] [53]. Estos sistemas permiten la medición indirecta del flujo másico de un fluido multifásico sin interferir en la distribución del flujo. Además, pueden beneficiarse de la alta frecuencia de adquisición de la tecnología de CMOS moderna y cámaras de alta velocidad que permite alcanzar muy buenas tasas de muestreo. En consecuencia, se propone crear un método indirecto de medición de flujo másico,

basado en imagen, que sea capaz de superar los problemas descritos anteriormente y pueda ser implementado para trabajar a alta frecuencia.

6.1. Descripción del método: Inspección del flujo de polvo durante la deposición LMD mediante el análisis de imagen a alta velocidad

El método de medición del flujo de masa que se propone para obtener una medición de la respuesta dinámica de la planta a una señal de entrada concreta en los actuadores, es un método óptico basado en el estudio de imágenes tomadas a alta velocidad. En un flujo multifásico gas-sólido, la fase sólida aparece normalmente repartida en forma de gránulos o partículas. Esta naturaleza discreta de la fase sólida puede ser observada por un sensor de imagen y, por lo tanto, utilizada para determinar el flujo másico. El principio concreto por el cual el método propuesto es capaz de adquirir el valor del flujo másico, está basado en la cuantificación del número de partículas que cruzan la imagen. Las partículas, durante el transporte neumático, se mueven a suficiente velocidad para no ser detectadas dos veces en el mismo punto del espacio de imagen de un sensor que las esté monitorizando, lo que conlleva que es posible implementar un sistema que cuente las partículas. En su forma más sencilla, un método de conteo de partículas consiste en observar el valor de un pixel a lo largo del tiempo. Cuando el valor de fondo no se detecta una partícula es contada. La cuenta de las partículas junto a un valor de peso medio por partícula permiten calcular la cantidad de masa total que fluye a través del circuito neumático. La principal ventaja es que no se requiere tener una noción del tamaño de la partícula ni de la velocidad de la misma para calcular el flujo, lo que simplifica el sistema óptico utilizado. Sin embargo, existen diversas dificultades para la implementación de un método de conteo de partículas como el que se propone. En primer lugar, está el problema de obtener el valor del peso medio por partícula y su varianza. En un principio, el peso medio y la varianza de una muestra de partículas no debería de ser difícil de obtener, ya que puede medirse experimentalmente; tam-

bién es posible obtener estos valores de otras fuentes disponibles, por ejemplo, en el caso del polvo suministrado para el proceso de recubrimiento, el fabricante suele proporcionar información relevante para el cálculo de estos valores como los percentiles de la distribución etc. En segundo lugar, está la incertidumbre generada por el tamaño de partícula y la velocidad de la partícula. En un sistema de adquisición de imagen el hecho de que las partícula se muevan a distintas velocidades puede provocar que estas pasen sin ser detectadas o sean detectadas múltiples veces en el mismo punto, dificultando la medición. En tercer lugar existe el tradicional problema del solape de la imagen de las partículas; debido a su proximidad en el espacio o su posición relativa con respecto al sensor de imagen, dos o más partículas pueden aparecer superpuestas como una, produciendo el subcontaje de las mismas. Este es un problema común en análisis de imagen de partículas o en velocimetría de partículas y tiene un efecto mayor cuanto más aumenta la concentración volumétrica de la fase sólida. Para afrontar estos problemas cada pixel en el sensor es interpretado como una variable aleatoria que puede adquirir dos valores y el vídeo obtenido por la cámara como una serie temporal n dimensional, donde n es el número de pixels en cada cuadro. En este contexto, la cuenta de las partículas en cada imagen se interpreta como un mapa o una aplicación entre el resultado obtenido por el sensor y los números naturales. El comportamiento de esta aplicación con el tiempo puede asumirse como un proceso estocástico estacionario bajo ciertas circunstancias y puede ser modelado. A partir del modelo, el valor de flujo másico puede ser inferido.

6.1.1. Desarrollo del modelo

Para el desarrollo del modelo necesario en la obtención del flujo másico, es importante entender que, en un flujo multifásico, este se comporta como una media móvil y para un intervalo lo suficientemente pequeño esta media se puede considerar constante. En este caso, si se toma una muestra de la cantidad de partículas con respecto al tiempo, existirá una media y una varianza finitas, que estarán relacionadas con una media y varianza del flujo másico a través de la función de distribución de masa por partículas, mientras el intervalo de tiempo sea lo suficientemente pequeño para considerar la media constante. La muestra se comportará como un proceso es-

tacionario y lo que es importante, el número de partículas estará distribuido según la distribución de Poisson. El hecho de que la muestra de partículas por fotograma siga una distribución de Poisson es una hipótesis comúnmente empleada en velocimetría de partículas. Se puede encontrar descrita por R.J. Adrian en [54]. La explicación de este fenómeno es sencilla, si se supone que las partículas aparecen aleatoriamente en una serie de muestras con un valor esperado (λ), la distribución de partículas por muestra debería corresponder a una distribución binomial, pero el número de muestras en un espacio dado no es finita, ya que puede subdividirse tanto como se quiera, entonces la probabilidad p de la distribución binomial $\binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$ se computa como $p = \lambda/n$ para que el valor esperado de la distribución coincida con la del flujo. Teniendo en cuenta esto, la distribución de partículas en un flujo queda:

$$\begin{aligned}
 B &= \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} = \binom{n}{k} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} = \\
 &= \frac{n(n-1)(n-2) \cdots (n-k+1)}{k!} \left(\frac{\lambda}{n}\right)^k \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{n-k} = \\
 &= \frac{n}{n} \cdot \frac{n-1}{n} \cdots \frac{n-k+1}{n} \frac{\lambda^k}{k!} \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k} \\
 \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{n} \cdot \frac{n-1}{n} \cdots \frac{n-k+1}{n} \frac{\lambda^k}{k!} \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda}{n}\right)^{-k} &= \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!} \quad (6.1.1)
 \end{aligned}$$

En una serie temporal, sin embargo, debe asumirse que existe independencia y una media constante. La aplicación de estos conceptos para la proposición del modelo puede explicarse de la siguiente manera. Debido al solape de la imagen de las partículas en el sensor, contar las partículas que pasan en frente de este, lo que podríamos expresar como definir un mapa $m1$ entre el resultado del sensor y los números naturales, no es posible. Solo es posible detectar las partículas solapadas lo que significa establecer otro mapa $m2$. Este $m2$ puede ser definido como una relación arbitraria entre el resultado del sensor y los números naturales. Entonces la relación entre $m2$ y $m1$ se convierte en otro proceso aleatorio, G , con una distribución de probabilidad $P(m2|m1)$. Si definimos $m2$ cuidadosamente es posible calcular la distribución de G para cada posible valor de $m1$. En consecuencia, la distribución de $m2$ quedará definida en términos de μ la media de $m1$ y G podrá modelarse a través de la

distribución de probabilidad marginal:

$$P(m2 = k) = \sum_n [P(m2 = k|m1 = n)P(m1 = n)] \quad (6.1.2)$$

Donde $m1$ sigue una distribución de Poisson. Con esto es posible relacionar la media de $m1$ con la media de $m2$. Como la media de $m2$ puede ser muestreada, es posible calcular la media de $m1$ con relativa precisión y por lo tanto obtener el flujo másico en el intervalo de tiempo estudiado.

Existen muchas maneras de modelar G y definir $m2$ para diferente tipos de sensores y situaciones. Por simplicidad y eficiencia computacional, el modelo utilizado en este trabajo está diseñado para sensores lineales. Las partículas en un sensor lineal ideal aparecen como grupos conexos de pixels con el mismo valor. Para la definición de G es conveniente asumir que todas las partículas muestran en el sensor el mismo tamaño. P se toma como el número de pixels que una partícula debe ocupar y debe tomarse por exceso, de manera que la primera operación para calcular $m2$ es segmentar el resultado del sensor y extender los bordes de cada grupo de pixels hasta que todos tenga un tamaño igual o mayor que P . Luego los grupos de pixels pueden contarse y en valor obtenido utilizarse como valor de $m2$. De esta manera la distribución de tamaño de partícula no afecta significativamente al resultado, y las partículas perdidas debido al solape causado por el tamaño añadido son recuperadas junto a las partículas no visibles en el sensor mediante la aplicación del modelo. G en este caso se define como la probabilidad de contar k grupos conexos de P pixels de n posibles para cualquier valor de n y cualquier valor de $k(k < n)$ teniendo en cuenta que estos grupos se posicionan aleatoriamente en un sensor de D pixels de acuerdo a alguna función de densidad φ definida en $[0, D]$. Una vez calculados, las soluciones pueden ser empleadas para construir la distribución de probabilidad de $G(\varphi, P)$ definida por conveniencia como $P_G(n, k)$. El modelo puede ser expresado de acuerdo a 6.1.2 como:

$$P(m2 = k) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\mu^i \cdot e^{-\mu}}{i!} \cdot P_G(i, k) \quad (6.1.3)$$

Donde μ es la media de $m1$. Como se expuso antes, es necesario una función de densidad de probabilidad para calcular el modelo. Esta función corresponde a la

distribución de concentración de la fase sólida observada por el sensor, y puede ser aproximada por el valor medio normalizado de cada posición del sensor durante el tiempo muestreado. Una vez que se tienen estos datos, el método funciona de la siguiente manera; tras tomar una muestra de n imágenes del sensor durante un tiempo t , m_2 es calculada, junto con φ y P_g , con estos datos el flujo másico se obtiene resolviendo para μ la ecuación:

$$\overline{m_2} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=k}^{\infty} k \cdot \frac{\mu^i \cdot e^{-\mu}}{i!} \cdot P_G(i, k) \quad (6.1.4)$$

y calculando

$$q_m = \frac{\mu \cdot \mu_m \cdot n}{t} \quad (6.1.5)$$

donde q_m es la tasa de flujo másico, μ_m es la masa media por partícula y t el tiempo total muestreado. Un punto relevante es que para un caso finito, G es invertible y el mismo resultado puede obtenerse operando:

$$\sum_{k=1}^i \sum_{i=1}^N P_G^{-1}(i, k) \cdot S_{m_2}(k) \cdot k = \mu' \quad (6.1.6)$$

En esta expresión similar donde S_{m_2} es la distribución de probabilidad de la muestra y μ' es una aproximación de la media buscada, P_G actúa como una función de pesos sobre S_{m_2} y el resultado tiene la ventaja de no ser dependiente del modelo de m_1 . Así que las condiciones del método para funcionar pueden ser relajadas y los cálculos pueden aplicarse a lapsos de tiempo y cambios de flujo másico arbitrarios.

Efecto de la covarianza:

En la sección anterior algunos problemas del método de conteo de partículas fueron abordados, como son la distribución no conocida de tamaños de partículas y el solape de las imágenes de las partículas. Sin embargo, hay un asunto importante que falta por resolver si se desea que el método funcione adecuadamente y está relacionado con el valor de la covarianza en el resultado del sensor lineal. En la sección anterior se supuso que los diferentes puntos de la muestra son independientes, pero no es así en un caso real. Cuando una partícula es detectada en el sensor existe una alta probabilidad de que sea detectada de nuevo en el siguiente fotograma,

este fenómeno depende a su vez de la velocidad y tamaño de las partículas así como de la frecuencia de muestreo. Es importante destacar que si la frecuencia se reduce, la probabilidad de dobles detecciones se reduce pero la probabilidad de perder partículas entre fotogramas aumenta. El efecto de la covarianza en el valor de los pixels sobre la medición del flujo másico es posiblemente complejo y ha de ser modelado solícitamente. Este problema no está abordado en el trabajo presente sino que lo que aquí se propone es un método para evitar en lo posible efectos de este fenómeno. La manera propuesta para afrontar el problema consiste en apagar una posición del sensor(pixel) tras una detección, de esta forma la misma partícula no puede ser detectada en dos fotogramas seguidos. Esta solución tiene una importante contrapartida y es que cuando las partículas vienen muy seguidas, algunas se pierden así que esta idea causa problemas cuando los flujos de masa son altos. A pesar de esto, este método permite que las mediciones puedan realizarse y el límite al valor de flujo másico puede ser incrementado de otra manera, como por ejemplo añadiendo más aumentos al sistema óptico por ejemplo.

Cálculo del modelo

El cálculo del modelo se realiza siguiendo un desarrollo clásico en geometría integral que se remonta a Buffon y su problema de las agujas. La computación del mismo, sin embargo, puede no resultar evidente ya que requiere de la deducción de alguna fórmula particular para la optimización computacional necesaria en el procesamiento de los datos de casos reales. En consecuencia, en este apartado se desarrolla el modelo concreto para la detección de partículas para el caso de sensores lineales basado en las ideas propuestas en los apartados anteriores. Para el caso que nos concierne el resultado consiste en obtener una serie de probabilidades $P_F(k, i)$ que componen la descripción de la distribución de probabilidad $P(G)$. Esta distribución relaciona la probabilidad de distinguir n partículas de tamaño S a partir de k posibles cuando estas están distribuidas aleatoriamente en un sensor de longitud determinada. Para comenzar, sea $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$ un intervalo, representando un sensor de longitud $b - a$; Cuando una partícula de sección efectiva S cruza el sensor, el

estado de este puede ser definida como una función g como sigue:

$$g : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \mapsto \mathbb{R} \quad g(x, S) = \begin{cases} 0 & \Leftrightarrow x < S/2 \\ 1 & \Leftrightarrow x > S/2 \end{cases} \quad (6.1.7)$$

Esta función es 0 donde la partícula ha sido detectada y uno en cualquier otro lugar del sensor. Con esta función así definida se puede representar un número arbitrario de partículas simplemente multiplicando funciones g entre sí. Así que, dadas N partículas de sección S , uniformemente distribuidas a lo largo de un sensor, es posible calcular la probabilidad de que una partícula al menos no aparezca solapada con el resto, siendo detectable. Sea $D = I^{N-1}$ un subconjunto de \mathbb{R}^{N-1} , y x un elemento de D , con x_i la i -ésima componente de x , entonces la probabilidad de solape de la N -ésima partícula puede ser expresada como la integral $N - 1$ dimensional sobre D :

$$P(N) = \frac{1}{(b-a)^{N-1}} \int_D \left(1 - \frac{1}{b-a} \int_a^b \prod_{i=1}^{N-1} g(x_i - h, 2S) \cdot dh \right) d\vec{x} \quad (6.1.8)$$

Es posible encontrar una solución cerrada a esta integral de la forma:

$$P(N) = 1 - \frac{1}{b-a} \left(\int_a^{a+S} (1-u+S)^{N-1} \cdot du + \int_{a+S}^{b-S} (1-2S)^{N-1} \cdot du + \int_{b-S}^b (1-b+u-S)^{N-1} \cdot du \right) \quad (6.1.9)$$

$1 - P(N)$ representa la probabilidad de detectar correctamente al menos una partícula. Es importante considerar que las partículas sobre el sensor no siguen una distribución uniforme en la mayoría de los casos. Así que sea φ una función de distribución de probabilidad definida sobre \mathbb{R} y Φ la correspondiente función de probabilidad acumulativa, siguiendo un razonamiento análogo al caso anterior, $P(N)$ puede ser expresado como:

$$P(N) = \int_D \left[\prod_{i=1}^{N-1} \varphi(x_i) \int_a^b \varphi(h) \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^{N-1} g(x_i - h, 2S) \right) \cdot dh \right] d\vec{x} \quad (6.1.10)$$

de lo que se obtiene:

$$\begin{aligned} P(N) = & \int_a^b \varphi(u) du - \int_{a+P}^{b-S} \varphi(u) [1 - (\Phi(u+S) - \Phi(u-S))]^{N-1} \cdot du \\ & - \int_{b-S}^b \varphi(u) [1 - (\Phi(b) - \Phi(u-S))]^{N-1} \cdot du \\ & - \int_a^{a+S} \varphi(u) [1 - (\Phi(u+S) - \Phi(a))]^{N-1} \cdot du \end{aligned} \quad (6.1.11)$$

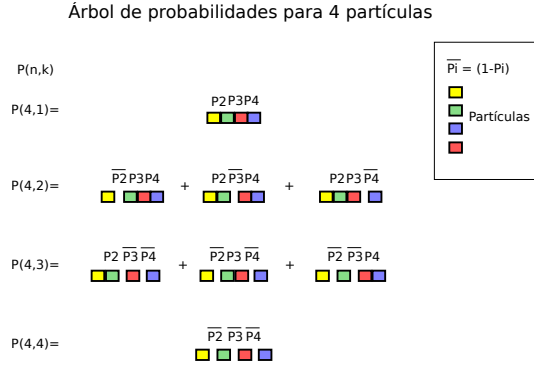


Figura 6.1: Gráfica del árbol de probabilidades para el cálculo de P_G

Esta última expresión normalmente no tiene solución cerrada pero puede utilizarse para obtener el valor de $P(N)$. Una vez se ha calculado este evento, otros eventos pueden ser calculados a partir de este como, por ejemplo, la probabilidad de que no se produzcan solapes entre las imágenes de las partículas o de que se produzca al menos un solape. La probabilidad P_G de observar k partículas de N puede ser calculada usando probabilidad condicionada de la misma manera, solo es necesario desarrollar el árbol de probabilidades como el de la figura 6.1. De esta manera podemos obtener la fórmula general para P_G como sigue. Sea $J = [2, N] \subset \mathbb{N}$ y C_k un conjunto de k tuplas definido como $C_k = \{x \in J^k : x_i, x_j \in x \Rightarrow x_i \neq x_j \forall i, j \in [1, k] \subset \mathbb{N}\}$ el conjunto de las combinaciones con reemplazo de los elementos de J tomados k de cada vez, entonces la probabilidad de detectar k partículas de N posibles en un sensor es proporcional a la suma de todos los productos de las componentes de cada combinación (k -tupla) c de C_k como se indica.

$$P_G(N, k) = \frac{1}{(k-1)!} \sum_{C_k} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (1 - P(c_i)) \cdot \prod_{i=2}^N P(i)}{\prod_{i=1}^{k-1} P(c_i)} \quad (6.1.12)$$

A partir del cálculo de P_G el cálculo del modelo es inmediato. Aplicando la fórmula para una distribución marginal y la distribución de Poisson se obtiene la ecuación 6.1.3.

Hay dos hechos destacables en esta fórmula, primero, P_G es siempre mayor que 0 mientras se cumpla la condición $N \cdot S < (b - a)$ y a la vez C_k es vacío cuando

$k > N$ lo que para un caso finito hace el proceso G representable a través de una matriz triangular, donde todos los elementos de la diagonal son positivos y por lo tanto invertible. El segundo punto es que el número de operaciones para calcular $P(G)$ es del orden de 2^N lo que hace imposible computarlo directamente. Para poder computar el modelo en tiempo real es necesario realizar una simplificación del cálculo.

En esta suma 6.1.12 se operan múltiples veces los mismos términos de manera que es teóricamente posible reducir el número de términos a computar manteniendo el resultado exacto. El primer paso para simplificar el cálculo es centrarse en computar los valores de $P_G(k, N)$ para un único valor N conjuntamente, lo que reduce los cálculos convirtiendo la fórmula original de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 P_G(N_0, k) = P_{N_0}(k) &= \frac{1}{(k-1)!} \sum_{C_k} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (1 - P(c_i)) \cdot \prod_{i=2}^{N_0} P(i)}{\prod_{i=1}^{k-1} P(c_i)} = \\
 &= \frac{1}{(k-1)!} \prod_{i=2}^{N_0} P(i) \sum_{C_k} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (1 - P(c_i))}{\prod_{i=1}^{k-1} P(c_i)} \text{ y sustituyendo } \lambda_{N_0} = \prod_{i=2}^{N_0} P(i) \text{ tenemos:} \\
 P_{N_0}(k) &= \lambda_{N_0} \cdot \frac{1}{(k-1)!} \sum_{C_k} \frac{\prod_{i=1}^{k-1} (1 - P(c_i))}{\prod_{i=1}^{k-1} P(c_i)} = \lambda_{N_0} \cdot \frac{1}{(k-1)!} \cdot \sum_{C_k} \prod_{i=1}^{k-1} \frac{(1 - P(c_i))}{P(c_i)}
 \end{aligned} \tag{6.1.13}$$

Con esta última simplificación podemos centrarnos únicamente en la parte de P_{N_0} que no es constante. Para ello es necesario añadir un par de definiciones.

Sea $A = \left\{ \frac{1 - P(j)}{P(j)} : j \in J \right\}$ entonces podemos definir:

$$\zeta_k A = \frac{1}{(k-1)!} \cdot \sum_{C_k} \prod_{i=1}^{k-1} a_{c,i} = \frac{P_{N_0}(k)}{\lambda_{N_0}} \text{ con } a_{c,i} \in A, a_{c,i} = \frac{(1 - P(c_i))}{P(c_i)} \tag{6.1.14}$$

$\zeta_k A$ está definido como la suma de todos los productos de k elementos de A partido por $(k-1)!$. Para ver el efecto de la nueva notación se puede realizar una expansión

para un caso concreto. Por ejemplo para $N_0 = 4$ y $k = 3$, C_k posee 6 elementos que corresponden a seis productos de tres elementos de A tomados dos a dos y con $\zeta_k A$ la notación se ve ligeramente simplificada:

$$\begin{aligned} \zeta_3 A = \frac{1}{2} \cdot \sum_{C_2} \prod_{i=1}^2 \frac{(1 - P(c_i))}{P(c_i)} &= \frac{(1 - P(2))}{P(2)} \cdot \frac{(1 - P(3))}{P(3)} + \frac{(1 - P(2))}{P(2)} \cdot \frac{(1 - P(4))}{P(4)} \\ &+ \dots + \frac{(1 - P(3))}{P(3)} \cdot \frac{(1 - P(4))}{P(4)} = a_1 \cdot a_2 + a_1 \cdot a_3 + a_2 \cdot a_3 \end{aligned} \quad (6.1.15)$$

Esto reduce el número de términos a expresar pero no el número de operaciones necesarias dado que ya se tiene en cuenta esta reducción en el cómputo inicial, para simplificar los cálculos necesitamos otra expresión de $\zeta_k A$. Para llegar a esta expresión es necesario hacer alguna definición más. Sea $A^0 = A$ y $A^i = \{(a - x_i) > 0 : a \in A^{i-1}, x_i \in R, i \in \mathbb{N}\}$ veamos como queda $\zeta_k A$ para un caso donde A tiene tres elementos:

$$\begin{aligned} \zeta_1 A &= a_1 + a_2 + a_3 \\ \zeta_2 A &= a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 \\ \zeta_3 A &= a_1 a_2 a_3 \end{aligned} \quad (6.1.16)$$

A partir de esto, utilizando las nuevas definiciones, $\zeta_2 A$ se puede escribir en función de $\zeta_k A^1$ como:

$$\begin{aligned} \zeta_2 A &= a_1 a_2 + a_1 a_3 + a_2 a_3 = (x_1 + a_1^1)(x_1 + a_2^1) + \dots + (x_1 + a_2^1)(x_1 + a_3^1) = \\ &= 3x_1^2 + 2x_1(a_1^1 + a_2^1 + a_3^1) + a_1^1 a_2^1 + a_1^1 a_3^1 + a_2^1 a_3^1 = 3x_1^2 + 2x_1 \zeta_1 A^1 + \zeta_2 A^1 \end{aligned}$$

La sustitución se basa en la definición de A^1 análogamente al ejemplo esta sustitución se puede realizar para el caso general. De esta manera $\zeta_k A^i$ se expresa de forma similar a una expansión binomial. Véase:

$$\zeta_k A^i = \binom{n}{k} x^k + \binom{n-1}{k-1} x^{k-1} \zeta_{k-1} A^{i+1} + \binom{n-2}{k-2} x^{k-2} \zeta_{k-2} A^{i+1} + \dots + \binom{n-(k-1)}{1} x \zeta_1 A^{i+1} + \zeta_k A^{i+1} \quad (6.1.17)$$

El resultado buscado se obtiene a partir de esta expresión. Si se toma $x_i = \min\{A^{i-1}\}$ un término de A^i es siempre 0, entonces los productos que contengan el valor 0 desaparecen reduciendo el número total de computaciones. Es trivial ver que cualquier otro $\zeta_m A^i$ se expande a su vez en una nueva suma de producto de binomios con un número menor de términos a su vez representable por una expresión 6.1.17 con un i mayor y así sucesivamente hasta que se llega a un valor de i lo suficientemente alto que A^i tenga un único elemento. Notar que realmente los términos que se vuelven 0 desaparecen de los conjuntos A^i en el formalismo utilizado. Finalmente, para realizar las computaciones, es importante tener en cuenta que si A tiene n elementos $\zeta_k A^{n-k} = \prod A^{n-k}$, lo que requiere menos operaciones que realizar la expansión de $\zeta_k A^{n-k}$ en función de elementos de A^{n-k+1} por lo que llegados a este punto no es necesario seguir calculando. El resultado final es que con esta simplificación se puede calcular P_{N_0} en aproximadamente $N_0^2/2$ operaciones y un número finito de elementos de $P(G)$ en $N^3/2$ aproximadamente.

6.2. Estudio del comportamiento del flujo másico mediante la monitorización basada en análisis de imagen

Para poder medir el flujo másico con el sistema propuesto es necesario validar que el método de medida proporciona resultados fiables, esto consta de dos partes, la validación del modelo matemático, que se usa en la inferencia del flujo másico y la comprobación de que las medidas cuantitativas obtenibles son acordes con los flujos másicos reales que se pueden observar en las pruebas de calibración del alimentador de polvo. Los experimentos consisten en la medición de flujos estacionarios. En estas pruebas el flujo másico, que es medido con el sistema de monitorización propuesto, se puede contrastar con las mediciones de peso utilizadas durante la calibración y ambas deben coincidir. También, al tratarse de flujos estacionarios, la distribución de partículas por fotograma se aproximará lo máximo posible a la del modelo teórico, de esta manera se puede comprobar si las distribuciones predichas por el modelo son

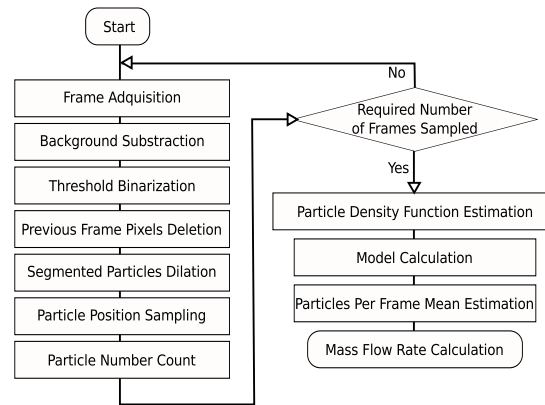


Figura 6.2: Diagrama de flujo de las operaciones realizadas en la monitorización de flujo másico

consistentes con los resultados obtenidos por el sistema de monitorización.

6.2.1. Implementación del método

En las pruebas de validación realizadas el método se implementa de la siguiente manera. El polvo saliendo de la tobera del cabezal se graba con una cámara tal y como se especifica en el capítulo 4. Del vídeo generado por la cámara se extraen dos tipos de datos, una muestra de las partículas observadas en cada fotograma y una muestra del número de partículas encontradas en cada pixel de la imagen. Para extraer estos datos, primero se realiza un procesamiento de imagen sencillo a cada fotograma. En este procesamiento el fondo es sustraído y la segmentación de la imagen se realiza mediante la aplicación de un threshold. Este proceso elimina el ruido estático y dinámico del sensor. Tras esto los datos resultantes son procesados. Primero si hay pixeles marcados de un fotograma anterior se eliminan asignándoles el valor del fondo. Después se localiza el centro de cada grupo de pixels conexos y estos son marcados para su eliminación en la siguiente imagen. Finalmente, se extiende las fronteras del grupo de pixels hasta que este alcanza un tamaño predeterminado. Una vez realizada esta operación se cuentan los grupos de pixels restantes y el valor obtenido se guarda como un punto de la muestra. Al mismo tiempo, cada posición de cada partícula, el punto central de cada grupo conexo de pixels, es almacenada durante todo el periodo de muestreo. Estos datos se usan para interpolar una función

de densidad sobre el sensor. El diagrama de flujo de todo el proceso puede verse en la figura 6.2. La función de densidad interpolada se utiliza como φ en el modelo y la muestras de partículas por fotogramas se considera una muestra de $m2$ en el modelo. Para la interpolación de φ se utiliza KDE(kernel density estimation) [56], un método no paramétrico que permite computar la función de densidad con rapidez además de garantizar que la función acumulativa sobre las dimensiones del sensor varía entre 0 y 1.

6.2.2. Condiciones del experimento

Las pruebas de validación se realizan con un polvo de acero Metco 316, Los datos para este material son: tamaño de partículas entre los 106 y las 44 micras y densidad de 8 kg/cm3. Tratándose de un tipo de polvo atomizado por gas, podemos afirmar que su distribución de tamaños de partículas aproxima una función de distribución log-normal [55] ($\ln N(\mu, \sigma^2)$) y conociendo el valor de los percentiles es posible calcular el tamaño medio de las partículas.

$$F_X = \int_{-\infty}^x \ln N(\mu, \sigma^2) = P(X \leq x) \quad (6.2.18)$$

$$Q_X(\tau) = F_X^{-1}(\tau) = \inf \{y : F_X(y) \geq \tau\} \quad (6.2.19)$$

$$\left. \begin{array}{l} Q_X(0,95) = s_1 \\ Q_X(0,5) = s_2 \end{array} \right\} \Leftrightarrow \sigma, \mu \quad (6.2.20)$$

La densidad del material es 8 g/cm3 y asumiendo que las partículas son esféricas el peso medio por partícula resulta: $1.33\mu\text{g/cm}^3$ El modelo necesita que se defina un tamaño aparente de partícula como constante de entrada. Para definir este valor se utiliza un flujo de polvo bajo en torno a 25.1 mg/s que se monitoriza con la cámara. En el vídeo extraído se inspeccionan unos pocos fotogramas para determinar cuál es el tamaño aparente de partícula más grande que se puede observar. Para este experimento el valor tomado son 7 pixels. Tras esto se realizan las pruebas. Se monitoriza el foco del haz de polvo generado por la instalación con la cámara durante una décima de segundo. Las muestras se toman con diferentes valores de velocidad del disco métrico, entre un 5 % y 70 % de la velocidad máxima. Para realizar el

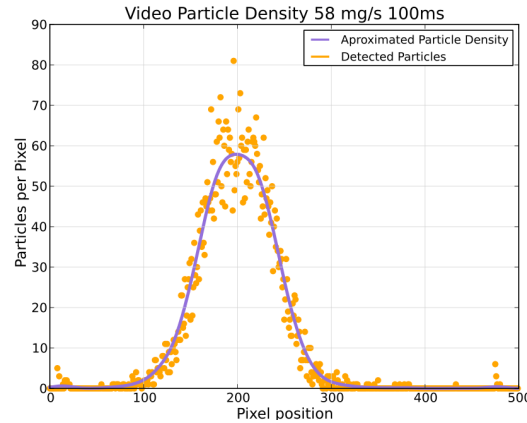


Figura 6.3: Distribución de partículas por pixel en el sensor junto a la función de distribución correspondiente representada a escala

proceso, el alimentador se enciende, se espera unos segundos para que alcance el flujo estacionario y la velocidad de disco deseada. A partir de entonces se hacen grabaciones de una décima de segundo para su posterior análisis por el software. El sistema utiliza una frecuencia de adquisición de 20000 Hz y se obtienen muestras de 2000 fotogramas para cada valor de velocidad del disco.

6.2.3. Validación del modelo

De los datos obtenidos por la cámara, primero se extrae la de distribución de partículas detectadas sobre el sensor, equivalente a un perfil de concentración. Estos datos se puede observar en la figura 6.3 A partir de él se interpola una función de densidad φ que es introducida en el modelo para realizar los cálculos teóricos. Del cómputo y ajuste del modelo se obtiene la distribución de partículas por fotograma, que se puede contrastar con la obtenida de los datos de la cámara en la figura 6.4 Los resultados muestran que tras medir un flujo al 5% de la velocidad máxima del disco el sistema cuenta 42000 partículas por segundo distribuidas en 240 pixels aproximadamente. Por otro lado, de la distribución de partículas por fotograma, se puede calcular mediante el test de Pearson el p-valor para cerciorarse de como el modelo concuerda con el resultado experimental, en este caso el p-valor está en torno a 0.74. Estos resultados permiten concluir que el modelo utilizado no puede ser rechazado, no obstante para hacer más fuerte el resultado podemos comparar

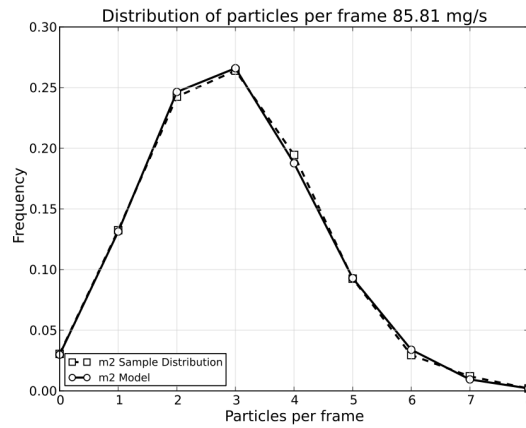


Figura 6.4: Ajuste del modelo a la muestra experimental de 1000 fotogramas a 5 % de la capacidad del alimentador

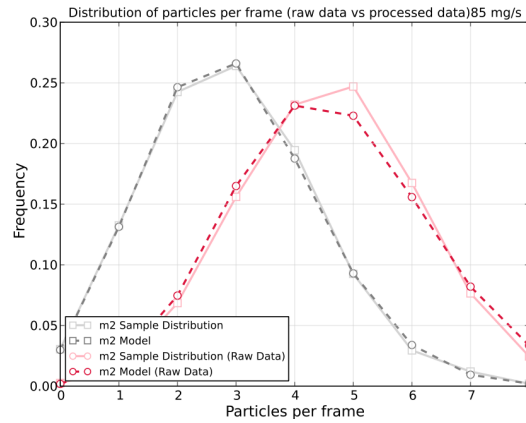


Figura 6.5: Ajuste del modelo con y sin el procesado para la eliminación de las detecciones dobles. Valores p 0.91 y 0.06

otros datos. En las hipótesis originales se decía que el efecto de la detecciones dobles invalidaba el modelo y que estas eran eliminadas mediante el apagado de ciertos pixels en cuadros no consecutivos. Podemos entonces comprobar como se comporta la distribución de partículas por fotograma con respecto al uso o no de esta operación y ver como afecta al ajuste del modelo. Para esto, se procesan los datos de otra medición, en este caso al 15 % de la velocidad máxima. Las distribuciones obtenidas pueden verse en la figura 6.5. El resultado del cálculo de los p-valores refleja una notable diferencia para el mismo conjunto de datos cuando se aplica el procesado de los datos y cuando no. Cuando las dobles detecciones son supuestamente eliminadas el p valor del modelo alcanza el 0.91. No obstante cuando no se eliminan el resultado

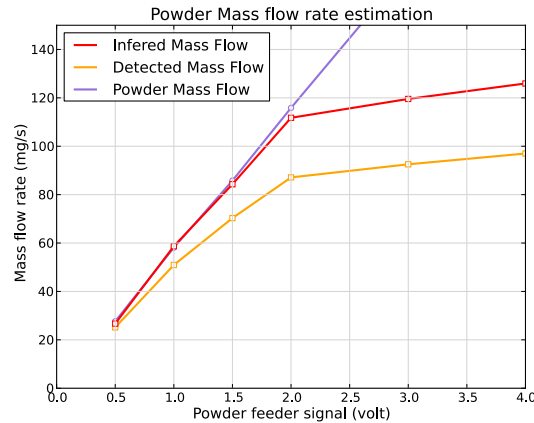


Figura 6.6: Gráfica con el resultado de las mediciones de flujo másico comparadas con la curva de calibración del alimentador

puede ser marginalmente rechazado con un valor p del 0.06. Teóricamente unos pocos pixels eliminados al azar no podrían tener semejante impacto en el resultado, por lo que es muy improbable que el modelo no sea correcto. En función de estos resultados parece razonable afirmar que la metodología propuesta y el modelo parecen ser acertados.

6.2.4. Validación de la medición de flujo másico

La segunda parte es valorar como de preciso es el sistema a la hora de medir el flujo másico. Para esto es necesario comparar el resultado del sistema de monitorización con medidas del peso de polvo. Estas medidas de peso son tomadas en la calibración del alimentador de polvo a partir de las cuales se realiza una regresión lineal, este proceso se explica en el capítulo 4. La validación de las medidas del flujo, en partículas por segundo, tomadas para el caso de validación del modelo, son transformadas ahora a miligramos por segundo usando el peso medio de partícula obtenido de los percentiles y la densidad del material. Una vez hecha la conversión de unidades los resultados se comparan contra la regresión lineal para el polvo Metco 316. El resultado se muestra en la figura 6.6. Los resultados requieren de cierta explicación; en la figura se observa que la inferencia del flujo másico es buena, los resultados coinciden con la curva esperada, sin embargo, a partir del 20 % de velocidad se produce la repentina saturación del sensor. Por otro lado se puede observar

que por debajo del 5 % de la velocidad máxima el valor inferido por el sistema es prácticamente igual al observado. En el caso de flujos pequeños esto es muy buena noticia, significa que para valores muy bajos es posible evitar el cálculo del modelo y, además, en el caso de tener muy pocas partículas, una o dos por segundo, el sistema seguiría funcionando, esto es un logro importante ya que muy pocos sistemas de monitorización de flujo másico pueden captar flujos muy pequeños [46]. El escenario opuesto lo vemos en el caso de flujos altos, la saturación del sensor no es sorprendente aunque sí interesante. En la descripción del método se decía que el efecto de la covarianza o las dobles detecciones produciría una pérdida de partículas en casos de flujo elevado. Esta es la razón de la saturación del sensor, lo interesante es que el solape de las partículas tomando como referencia la imagen puede definirse con dos coordenadas solape horizontal y vertical. Con este método el efecto del solape horizontal puede eliminarse no así el vertical. Este solape vertical dependerá de la velocidad de las partículas, lo que significa que en flujos con velocidad de partícula más alta el sistema responderá mejor. En el caso actual se pueden proponer dos soluciones; la primera consiste en incrementar la potencia óptica. Un incremento del aumento de la imagen tendrá como consecuencia una medida más precisa y un límite de saturación más elevado. Otra solución es proponer nuevos modelos en el que se tenga en cuenta el efecto de las detecciones dobles y que posibilite medir rangos más amplios de flujo másico.

6.2.5. Mediciones del comportamiento dinámico del flujo másico

El siguiente punto es verificar si el sistema puede proporcionar una monitorización satisfactoria del flujo másico en tiempo real, en la que se pueda percibir cambios o perturbaciones inesperados y la respuesta transitoria del flujo másico a variaciones bruscas en la señal de consigna. Para este fin, la configuración experimental es similar a la utilizada en los resultados del apartado anterior, pero las muestras se toma durante 5 milisegundos. Cada muestra tendrá únicamente 100 medidas por lo que la relación señal ruido será menor. Para realizar esta prueba se lanza un programa que produzca variaciones de flujo másico. La monitorización abarca el proceso de

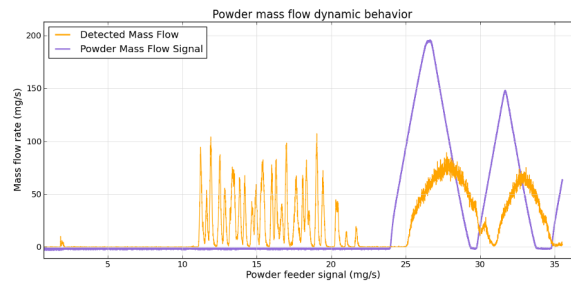


Figura 6.7: Gráfica del comportamiento dinámico del flujo de polvo ante variaciones de la señal del motor

puesta en marcha del alimentador y dos ciclos de incremento y parada utilizando la aceleración máxima posible del disco para la configuración del control del servo. La idea es observar la riqueza total de datos y que fenómenos producidos por el sistema mecánico de la instalación son notables en el comportamiento del flujo másico. Un segundo objetivo es medir la tasa real de cambio cuando el alimentador está sometido a distintos tiempos de ciclo. Los resultados se muestran en la figura 6.7. En estos resultados, la gráfica muestras dos líneas; en una, la señal de los tacómetros del motor se ha expresado en términos de flujo másico calibrado en condiciones estacionarias para cada voltaje, siendo la pendiente de esta curva coincidente con la tasa máxima de cambio de flujo posible con el alimentador y material y su valor con el flujo nominal. Por otro lado la segunda línea mide la cantidad de masa observable por el sistema de monitorización. En la gráfica se pueden observar diversos hechos notables. Primero una serie de picos aparece tras 10 segundos de activarse el alimentador, estos picos corresponden al flujo de Nitrógeno que proviene del circuito del polvo que es activado antes que el disco; el flujo arrastra los restos de polvo de acero en los conductos y los precipita a través de la tobera del cabezal generando la señal en el sensor. Es remarcable que el sistema de monitorización pueda medir estos flujos de masa con precisión aunque alguno de los valores de pico posiblemente sobrepasen el límite de saturación. En una segunda parte de la gráfica tenemos la subida de la señal del motor. En este intervalo se puede observar el retraso de la respuesta del polvo, la primera señal de cambio en la medida del flujo casi un

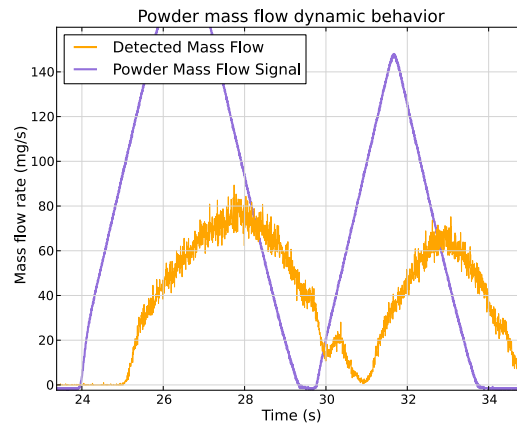


Figura 6.8: Gráfica de la monitorización de una perturbación en comportamiento dinámico del flujo de polvo

segundo y medio tras la señal del motor. También se puede observar que la señal del flujo másico no puede seguir el cambio de valor predicho por la señal del motor, no alcanzando su valor de flujo másico nominal. Se observan también cambios en la pendiente del flujo másico muy probablemente causadas debido al efecto de la fricción estática en la aceleración del disco. También se observan cierta descorrelación en la tendencia de ambas señales. Al descender, se forma un pico de flujo másico que no puede explicarse con la señal del motor, ver figura 6.8. Esta perturbación se produce únicamente cuando la velocidad del disco es baja y probablemente está relacionada con algún efecto de la fricción sobre el comportamiento del controlador. Como conclusión de este experimento, se puede decir que la resolución temporal con la que se puede observar el flujo másico es buena y que la dinámica del flujo puede ser analizada. También es importante decir que, de acuerdo con estos datos la respuesta transitoria del flujo de masa es más lenta de lo esperado y las expectativas para el cambio de composición de la mezcla de polvo deben ser corregidas a la baja.

6.3. Tasa real de cambio de composición

Se concluye, tras los experimentos monitorizando el polvo, que las tasas reales esperadas cuando el alimentador utiliza el máximo de su aceleración deben ser menores de lo esperado teóricamente. Esta era la cuestión que quedaba por zanjar sobre

el comportamiento de las tasas de cambio de composición. Para obtener un control preciso de las tasas de cambio sería adecuado hacer uso de un modelo de primer o segundo orden, o uno de los modelos conocidos para el control de servomotores. En conclusión, no es factible continuar buscando una mejora en la resolución del gradiente sin antes no estudiar las perturbaciones del alimentador y realizar las correcciones necesarias en la máquina o en el controlador de la misma. Sin embargo, podemos determinar finalmente las tasas de cambio de composición con la que un gradiente de material puede ser realizado sobre una capa de material depositada en un proceso de prototipado.

Capítulo 7

Conclusiones

La consecución de un proceso de prototipado de materiales funcionales con LMD pasa por la necesidad de implementar un método de discretización y deposición de material a partir de una función de distribución de distintos materiales o fases en el espacio. La implementación de tal proceso en un sistema LMD real se ha estudiado a lo largo de este trabajo, centrándose en cada aspecto del método y realizando un completo análisis de las principales dificultades y limitaciones que el proceso posee. Los resultados obtenidos de este análisis y las soluciones propuestas a los problemas presentados van acompañados de una extensa verificación experimental, así como de un trabajo exploratorio en los aspectos problemáticos del proceso menos conocidos, como el control de la respuesta dinámica de los actuadores de los alimentadores de polvo. Finalmente, también se ha experimentado con composites Ni-WC para la tarea de fabricación de FGM contemplando la problemática de obtener una deposición correcta cuando se altera la concentración de carburos que evite porosidad y discontinuidades. Se han determinado las características más adecuadas de morfología del cordón, dilución y la limitación de concentraciones posibles en distintas condiciones.

Una de las principales carencias del trabajo es la falta de ejemplos de aplicación de los resultados, por ejemplo, la fabricación de piezas con patrones complejos de distribución de material. Es importante, a este respecto, destacar que el sistema propuesto hace totalmente posible la realización de estos ejemplos pero, como se determina en el estudio experimental, las características del material utilizado definen unas restricciones a su deposición que no hacen viable la fabricación de piezas cuyo

análisis arroje más información concluyente sobre la metodología. Dado que la tasa de cambio obtenida es baja, las piezas necesarias para observar estas distribuciones complejas serían de un tamaño inviable para su análisis. Mas allá de este resumen donde describe los puntos de interés y carencias del estudio, la discusión detallada de los resultados obtenidos se realiza en tres bloques; Uno, donde se relatan las conclusiones relacionadas con la deposición de materiales heterogéneos en el proceso de fabricación, otro donde se resumen las conclusiones de la realización de gradientes con composites Ni-CW y finalmente una valoración de la técnica en su conjunto y de como en función de los resultados obtenidos se vislumbran las posibilidades del proceso para el futuro.

7.1. Deposición de materiales heterogéneos con LMD

El método presentado a lo largo de este trabajo ha demostrado la viabilidad de la fabricación de materiales de gradiente funcional en un entorno de fabricación aditiva con el objeto de poder realizar prototipos de piezas escogiendo la composición puntual de las mismas. La combinación de los dos principios de fabricación multimaterial posibles en sistemas LMD da lugar a la posibilidad de utilizar funciones de distribución de material arbitrarias. Con los resultados obtenidos en este estudio se pueden determinar las limitaciones de estas distribuciones así como sus parámetros de fabricación. Esta tesis ha servido para abordar y resolver algunos de los problemas esenciales relacionados con la fabricación multimaterial aplicables a otros procesos, que son la sincronización de los posicionadores con respecto al flujo másico del polvo, la consecución de distintas y precisas tasas de cambio de composición y la correcta detección y monitorización del flujo másico de polvo para la posible alerta de perturbaciones que puedan perjudicar la obtención de la composición deseada.

En los resultados obtenidos se comprueba la importante interdependencia entre los parámetros en la definición de las tasas de composición. La tasa de cambio observada en los experimentos depende directamente de los parámetros de flujo másico y velocidad de avance tal y como se propone en el capítulo 3. En las pruebas de gradientes continuos se observa como la tasa de cambio de composición se puede ajustar

cambiando la velocidad y como los efectos de la cantidad de masa depositada tiene más peso sobre la tasa de cambio de composición que los valores nominales de cambio de flujo del alimentador. Partiendo entonces de que, generalmente, cualquiera que sea la estrategia de fabricación de un FGM con LMD la resolución en la discretización del mapa de composición viene determinada en función del ancho y alto del cordón. Para cualquier caso en el que una relación de aspecto aceptable del cordón sea posible, una menor sección de cordón dará una mayor resolución dimensional. La masa depositada es una función de esta sección, y la tasa de cambio posible con el alimentador de polvo es función de la masa y la velocidad. En consecuencia, es posible obtener muy altas resoluciones para la función de distribución que define el gradiente siempre y cuando los materiales puedan ser depositados con tales parámetros. En resumen, se ha probado que, para una función de distribución dada el ancho del spot, la velocidad de escaneo y el flujo másico determinan la posibilidad o no de su fabricación, dadas unas características determinadas del comportamiento del alimentador. Sin embargo y en una segunda parte, a través de la precisa monitorización del flujo másico, se ha comprobado que la definición de la tasa de cambio constituye un problema más complejo de lo que en una primera inspección pudiera parecer. El estudio de los resultados llevados a cabo con ciertas tasas de cambio de composición con carburos de Tungsteno, así como los resultados de la monitorización, indican que no se puede asumir de manera fácil una tasa constante de cambio de flujo másico para el alimentador. Un estudio del comportamiento de la respuesta transitoria del flujo másico a los cambios en la señal de entrada del controlador es necesario para garantizar un cambio de flujo másico constante a lo largo del proceso. Este tipo de estudios puede dar un resultado distinto dependiendo del rango total de flujo de masa para el que trabaje el alimentador, debido a efectos no lineales como el rozamiento estático de la parte mecánica de la máquina. Está, por supuesto, fuera del alcance de este estudio describir estos problemas en su totalidad, teniendo en cuenta además, las diferentes tecnologías de dosificación del polvo existentes.

7.1.1. Sincronización del alimentador de polvo

En la deposición de cordones con composición heterogénea dentro de la fabricación de un FGM, no sólo es importante conseguir el correcto valor de masa de todos los componentes en polvo, sino que es esencial sincronizar el momento en el que el polvo de alimentación alcanza su composición correcta con el momento en el que el posicionador de la instalación alcance el punto de la pieza en la que se requiere este valor. Las pruebas realizadas demuestran una sincronización precisa entre el posicionador y el alimentador de polvo, que puede comprobarse con el principio y fin de los gradientes dentro del cordón en las muestras depositadas. Con esto, queda demostrado que el método propuesto para la sincronización del polvo es efectivo y no requiere de ensayos destructivos como se plantea en otros experimentos anteriores con FGM.

7.2. Realización de gradientes de composición Ni-WC

En la parte experimental del trabajo se ha realizado un estudio de parámetros extensivo que incluye, como complicación adicional, la composición del cordón como una de las variables a analizar. Debido a que es necesario garantizar la deposición en capas superpuestas para la fabricación de un sólido, en la selección de búsqueda de los parámetros válidos, se valora la dilución, eficiencia, relación de aspecto del cordón y el solape para la deposición de cordones adyacentes. A diferencia de otros materiales, estos MMC tienen comportamientos muy diferentes cuando se utilizan las distintas composiciones límite y esto supone una dificultad añadida a la creación de FGM. Esta mayor dificultad se produce porque los cambios en las propiedades se deben a la dispersión de una fase de refuerzo que en muchos casos no puede existir sola. En este caso no es posible depositar un cordón con un 100 % de WC. En este tipo de materiales compuestos donde el gradiente se realiza con una fase que no puede existir sola, las dificultades a altas concentraciones de la fase de refuerzo son muy complejas y de muy diferente naturaleza. Estos problemas no se dan en FGM

donde en los distintos componentes que se varían pueden existir concentraciones del 100 % [58]. En consecuencia, los parámetros óptimos de deposición obtenidos para la realización de gradientes muestran ciertos compromisos entre distintas condiciones que determinan la calidad de cordón, no pudiéndose obtener un resultado perfecto en todos los aspectos (eficiencia, dilución, ancho del cordón etc). Los resultados muestran que es posible la deposición, ajustando los parámetros, en todo el rango de composiciones para formar bloques compactos mediante la superposición de capas de espesor uniforme y composición heterogénea. Los parámetros presentados además abarcan también los casos de deposición para volumen constante y masa constante.

7.2.1. Concentraciones límite de WC

Otro aspecto del problema de depositar gradientes de WC en Ni es comprobar las concentraciones límite que pueden utilizarse en los solapes o en la superposición de cordones. En estos casos, tras realizar y analizar las muestras, se ha observado una deposición posible entre 0 y 45 % en peso de WC siendo viable la deposición de hasta un 60 % en algunas circunstancias. La dureza de la matriz ha resultado ser un aspecto determinante en la deposición del recubrimiento, siendo este susceptible de agrietamiento cuando se superan los 500 HV. Este condicionamiento proviene una vez más del hecho de que en estos materiales compuestos la fase de refuerzo no puede existir sola, dificultando el cambio de composición posible y limitando la concentración máxima que puede obtenerse.

7.2.2. Deposición de cordones de composición heterogénea

Estos resultados del límite de composición se llevan a la deposición de cordones heterogéneos, donde se observa un comportamiento muy preciso de la composición. Los cordones muestran los gradientes programados con una alta precisión dimensional y con unos ratios de Ni-WC correctos en todos los puntos. El material depositado muestra una microestructura acorde con las muestras de composición constante y las propiedades de este, dureza y difusión de WC en la matriz, muestran una correlación perfecta con el cambio de composición medido por la fase en volumen. Las

concentraciones máximas y mínimas concuerdan con lo observado en la superposición de capas de distinta composición en todos los casos estudiados. Es importante explicar que estos MMC sufren de discrepancias en la concentración, debido a efectos locales. Estos efectos son, principalmente aglomeración de carburos y falta de los mismos debidos a una mayor disolución en la matriz [59]. Aunque en las muestras depositadas no se han observado estas incidencias no se descartan totalmente en procesos muy largos. Otro punto importante es que la concentración de WC se mide con promedios, lo que conlleva cierta incertidumbre en la determinación de la concentración en una posición dada. No obstante, en las pruebas realizadas, no supone este error una desviación notable. Finalmente, las tasas de cambio de composición obtenidas son del orden de un 1.5 % por milímetro. Ratios de cambio más altos son posibles, pero la fiabilidad de estos gradientes no se puede asegurar. Esto es debido a incertidumbres en el comportamiento transitorio del flujo de polvo cuando se opera el controlador con aceleraciones más altas. Los fenómenos que constituyen estos problemas pueden observarse con el sistema de monitorización de flujo másico, propuesto en este mismo trabajo.

7.2.3. Parámetros de deposición

Los parámetros de deposición, finalmente optimizados, permiten la fabricación de capas continuas de espesor constante para todas las concentraciones de carburos dentro del rango 0-60 %wt. y estos resultados permanecen estables pese al cambio de composición del sustrato o el cambio de concentración de carburos a lo largo de la capa. Los resultados muestran capas continuas sin grietas ni porosidad.

7.3. Valoración de la técnica

Para hacer un balance de las capacidades de la tecnología LMD para el prototipado de materiales con gradiente funcional, es imprescindible tener en cuenta las diferencias constructivas entre los distintos sistemas existentes, cabezales, características del láser, posicionadores y alimentadores de polvo. Los posicionadores de las instalaciones no suponen, teniendo en cuenta los resultados observados, un problema

en la fabricación de gradientes. En la mayoría de los casos poseen precisiones que superan la fracción de milímetro, suficiente para las resoluciones de gradiente que normalmente son posibles. El posicionador de una instalación LMD, sin embargo, tiene un impacto en el coste de implementación del proceso. La sincronización entre los distintos actuadores requerirá de una intrusión en el sistema mayor o menor en función de las capacidades del controlador del posicionador para trabajar con actuadores externos y comunicarse con otros controladores, así como de la potencia de cálculo disponible propio del posicionador. No se pueden especificar estas características al detalle dado que es posible una infinidad de maneras de implementar la fabricación multimaterial en una instalación dada, pero se puede generalizar a que posicionadores con controladores potentes, con capacidad de proceso multi-hilo y distintos buses de comunicación, tanto analógicos como digitales, son preferibles a la hora de implementar el proceso.

Las características del Láser influyen en dos aspectos fundamentales en lo que atiene a la implementación de la fabricación FGM. Por un lado afecta a los materiales que es posible depositar limitando la combinación de materiales con los que se pueden realizar transiciones de composición. Por otro lado, afecta al tamaño del cordón más pequeño para el que se puede conseguir un proceso fiable. El cabezal del sistema tiene un efecto similar al del láser sobre el proceso. En este estudio se han realizado los procesos de deposición con dos cabezales diferentes, no se ha encontrado mayor problema a la implementación del proceso con ninguno de ellos. Las restricciones más importantes vienen por los tamaño de partícula permitidos al cabezal y el tamaño mínimo de cordón que se puede obtener con una eficiencia aceptable. Finalmente, el alimentador de polvo es la característica mas importante y en cierta manera el punto débil de la instalación. En este trabajo se ha planteado el proceso de prototipado de FGM como dependiente del sistema de alimentación, a partir de lo cual se ha generado un proceso de deposición de FGM válido para cualquier función de distribución de material. El alimentador de polvo delimita cuantos componentes de la mezcla se pueden usar al mismo tiempo así como la tasa de cambio de composición máxima. Esta tasa de composición depende del comportamiento del polvo y tiene que modelarse para cada instalación utilizando el sistema de mo-

monitorización propuesto, con el consecuente trabajo de implementación del sistema de control correspondiente. Es importante tener en cuenta que, en el proceso de fabricación aditiva, la tasa de deposición es la principal figura de mérito dado que determina el tiempo de proceso, que crece con el cubo de las dimensiones principales de la pieza. En este caso, la tasa de cambio de composición en el alimentador se reduce al cuadrado de este valor, lo que indica que la velocidad en la fabricación de FGM no es el punto más fuerte de la técnica. No obstante, el estudio concreto del control dinámico del flujo de polvo en investigaciones futuras puede solucionar este problema parcial o totalmente. En términos globales de resolución teniendo en cuenta que se pueden conseguir focos de medio milímetro, para tasas de cambio del orden de las nominales medidas para el alimentador de polvo utilizado, se puede considerar viable la realización de gradientes con resoluciones de 3 milímetros. Para aplicaciones de microcladding con sistemas de alimentación de polvo específicos es muy posible resoluciones de gradientes menores a un milímetro.

7.4. Sistemas de imagen para la monitorización del flujo másico durante procesos LMD

En los sistemas LMD y Laser Cladding, el flujo de partículas de polvo entre la tolva, donde está almacenado, y la superficie de trabajo, tiene un gran impacto sobre el comportamiento del proceso, afectando normalmente a la eficiencia, la calidad de cordón y la precisión dimensional de la pieza. En estos casos, es importante conocer la distribución de partículas de polvo y el flujo másico así como la velocidad. Estos valores, sin embargo, pueden cambiar con el tiempo durante el funcionamiento de la máquina o verse afectadas por perturbaciones. En los sistemas de deposición de metales con láser, como se ha explicado, se crean gradientes funcionales mezclando distintos flujos de polvo en el baño fundido, con lo que monitorizar la tasa de cambio de flujo de polvo con el tiempo es fundamental. Desafortunadamente el comportamiento dinámico de la fase sólida en un fluido de dos fases es difícil de determinar y en la mayoría de los procesos de LMD no se estudia. En esta tesis se ha propuesto un sistema de medición del flujo másico especializado en casos donde un flujo di-

reccional con fase sólida diluida pueda estar sometido a condiciones no controladas, donde la concentración de partículas no puede ser asumida uniforme y puede variar rápido en el tiempo. El sistema propuesto es de naturaleza óptica y se ha diseñado de tal manera que es resistente a los efectos ambientales como cambios en la iluminación o contaminación del sensor. El sistema se ha descrito en detalle, tanto su funcionamiento como su diseño, también se ha construido un prototipo del mismo y validado en un caso real. Los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados prueban que el sistema es preciso y que el principio de conteo de partículas en el que está basado puede ser declarado válido. El modelo estadístico propuesto para la distribución de partículas por fotograma se ha observado que funciona adecuadamente y el flujo másico en los jets de polvo producidos por el sistema de LMD se ha medido con muy buena resolución temporal. Se entiende que el método propuesto puede funcionar como sistema de monitorización en una aplicación real. En los test realizados es posible apreciar que el sistema es capaz de medir flujos muy pequeños. En estos casos la inferencia de las partículas observables no tiene casi ningún efecto siendo posible evitar el cálculo del modelo. Esto sucede debido a la baja probabilidad de superposición de las imágenes de las partículas en flujos pequeños. Los datos muestran que el sistema puede detectar un flujo de entre 1 y 90000 partículas por segundo arbitrariamente distribuidas en un sensor, moviéndose a una velocidad de entre 4-5 m/s. A pesar de estos buenos resultados se han encontrado limitaciones. El número de partículas que el sistema puede medir muestra un impráctico límite superior. Debido al tratamiento de los datos utilizados para reducir el impacto de las dobles detecciones en la distribución de partículas por muestra, mucha información importante se pierde. Esta pérdida de información produce un efecto perjudicial cuando la cantidad de partículas por segundo aumenta, causando la aparición del límite. Este efecto puede ser mitigado incrementando los aumentos del sistema óptico, lo que incrementará el número de partículas por segundo que es posible medir. Otra posibilidad para afrontar este problema es desarrollar modelos más completos que incluya la dependencia de las muestras debido a las detecciones múltiples de partículas.

Este método, con todas sus carencias, tiene grandes ventajas para la medida

de flujos direccionales sólido-gas de fase diluida. Es capaz de conseguir la medición en tiempo real con tasas de muestreo muy buenas (200 Hz) y los resultados son independientes de la estructura del flujo. Es un sistema no invasivo, lo que lo hace capaz de medir el flujo másico desde una distancia considerable, y debido a que utiliza únicamente información óptica, no es susceptible al material transportado mientras este tenga una buena reflectividad en una banda del espectro óptico, extensible al infrarrojo cercano si están disponibles sensores adecuados. Una de las características más impactantes del método es la habilidad para medir el flujo másico sin medir la velocidad de las partículas. Este hecho, sin embargo, no hace que el sistema ignore esta velocidad. La velocidad de partícula afecta a la frecuencia de adquisición, así que un cambio repentino de velocidad puede hacer que el sistema se comporte de forma errática. Hipotéticamente, podría ser posible para el sistema compensar esta clase de errores dado que se puede observar estos cambios en la función de covarianza temporal de los valores de los pixels, pero esto no está estudiado de momento. Otro importante efecto es que, para el mismo flujo másico, la distancia entre partículas se reduce con la velocidad, causando la saturación del sensor de la misma manera que el incremento de partículas, descrito anteriormente, producía un límite en el flujo de masa medible. A parte de estas, existen otras características del método que vale la pena comentar. El principio de medida utilizado es extensible al plano para su uso con sensores de dos dimensiones. En tal caso, el procesado de la imagen es más complejo y demandará un hardware más potente. Por otro lado, la cantidad de partículas por pixel se reducirá mediante un factor cuadrático y la medida del flujo másico será mucho más precisa. Otra importante característica del método es la posibilidad de usar múltiples sensores para observar diferentes partes de la superficie de control, o utilizarlos junto a diferentes ópticas para obtener una profundidad de campo mayor. El único requisito es que la misma partícula no sea observada en el mismo momento en distintos sensores. Esto puede incrementar la versatilidad del sistema de medida y hacerlo aplicable a situaciones más complejas. En tercer lugar, se puede utilizar conjuntamente con filtros ópticos y sistemas de iluminación para estrechar el espectro óptico visible a la cámara. Esto permite proteger de la contaminación lumínica el sistema sin que se requieran mayores cambios al procesado

de las imágenes o la calibración del método. En los sistemas de LMD, como los que se usan en esta tesis, pueden permitir la medición del flujo de masa durante el proceso de deposición cuando la luz láser y la radiación del baño fundido pueden interferir con el sensor.

7.5. Aplicación de los resultados

Existen cuatro aspectos relacionados con el procesado y ciencia de materiales en los que este estudio realiza aportaciones importantes. Principalmente, tienen que ver con la fabricación mediante deposición con láser pero también se abarcan campos no directamente relacionados con esta, como pueden ser la motorización de sistemas de transporte neumático en instalaciones industriales o el diseño de nuevos composites. Además los conocimientos y experiencias ganados en la consecución de esta tesis se han utilizado para hacer importantes aportaciones en proyectos de I+D+I así como participaciones en diversas conferencias y congresos.

7.5.1. Determinación de una metodología para fabricación de sólidos heterogéneos con alta repetibilidad

Gracias al estudio detallado del comportamiento de los distintos controladores de una instalación LMD se ha logrado implementar con éxito una metodología para la fabricación de sólidos multimateriales que permite el prototipado de FGM a partir de dos materiales precursores en polvo. En esta metodología, la precisión y repetibilidad de la fabricación de un sólido multimaterial está garantizada y es un paso importante en el desarrollo de los procesos de fabricación de FGM además es extensible para su uso con un número mayor de componentes en polvo. El proceso desarrollado tiene la característica de permitir el paso del diseño del FGM al paso de fabricación, de manera automática sin necesidad de un trabajo extra en el estudio del método de fabricación. Esto es así porque con los datos obtenidos del alimentador se puede realizar la discretización del gradiente y determinar el grado de exactitud con el que se puede fabricar el sólido, además de calcular el tiempo que durará el proceso.

7.5.2. Mejora en la operación y motorización de procesos Laser Cladding

Una de las expectativas del grupo cuando se planteó el trabajo, era que el desarrollo de la técnica de prototipado de materiales con gradiente funcional tendría un impacto en la mejora de los procesos tradicionales de recubrimiento con láser y fabricación aditiva con LMD. Esta clase de procesos se ha beneficiado tradicionalmente del uso de sistemas de control en lazo cerrado para mejorar el resultado [57]. La introducción de precisos controladores del flujo de polvo, basados en el sistema de monitorización propuesto, pueden permitir la reducción del gasto de material en los movimientos de traslación y posiciones de espera dentro del proceso de deposición. En la mayoría de casos, cuando el proceso requiere de movimientos no productivos (desplazamientos del posicionador donde no se produce deposición) el alimentador malgasta polvo. Esto es así porque no se puede detener el alimentador y garantizar que el flujo de polvo será estable y correcto cuando el nuevo punto de deposición sea alcanzado. Con la precisa caracterización de los retrasos en el sistema de alimentación así como del flujo másico y la sincronización que se consigue entre el posicionador y el alimentador para procesos de fabricación multimaterial, es posible implementar programas de control del alimentador que reduzcan el gasto de material durante el proceso. Otro punto, más importante, está relacionado con la monitorización de los haces de polvo generados por el cabezal. En este caso se ha desarrollado la capacidad de calibración de los alimentadores de modo automático con la monitorización de vídeo. La capacidad de observar el flujo de polvo durante el proceso en conjunto con un sistema que detecte automáticamente perturbaciones y desalineamientos del foco del polvo o estructura del haz, puede evitar problemas en procesos largos o cuando la máquina opera desatendida durante mucho tiempo. Mencionar que este campo de la monitorización de flujo másico está muy poco estudiado y no hay casi casos reportados de sistemas de monitorización en tiempo real, lo que incrementa la importancia de la aportación.

7.5.3. Contribución a las técnicas experimentales usadas en la investigación en materiales

El trabajo realizado puede interpretarse como un desarrollo de las técnicas experimentales para el estudio del comportamiento de materiales heterogéneos aleaciones y composites. De hecho, el uso de las técnicas de deposición con cambio en la mezcla de flujo de polvo fueron utilizadas en un principio para el estudio de aleaciones [38]. Con los resultados obtenidos, se puede afirmar que la técnica desarrollada permite experimentar y validar modelos matemáticos en ciencia de materiales que tratan de determinar el comportamiento de materiales heterogéneos, aleaciones y FGM [38] ya que las muestras para la verificación experimental de dichos resultados pueden obtenerse de manera automática y con precisión.

7.5.4. Monitorización de la masa en flujos multifásicos: Un problema extendido en la industria

Los sistemas de monitorización de flujo másico basado en imágenes no tienen una aplicación exclusiva al ámbito de la deposición láser. En una amplia variedad de actividades industriales los materiales en polvo o granulados son transportados mediante gas a través de un circuito cerrado o dispersados en el entorno. Algunos ejemplos de esto pueden ser: El transporte de carbón pulverizado en la industria de generación de energía, la distribución de fertilizantes, el control de la polución, la producción de cemento o aplicaciones de dosificación en la industria farmacéutica o química. En estos casos, es muy difícil determinar el flujo másico debido, principalmente, a la gran variabilidad que hay presente en estos flujos multifásicos. Cualquier método de medida tiene que ser adaptado a las particularidades del tipo de material transportado, tamaño de partícula, la carga de fase sólida y las inhomogeneidades de la distribución de la misma. Esta variabilidad hace que, habitualmente, para medir el flujo másico sea necesario desarrollar soluciones específicas caso por caso. Varios sistemas basados en el análisis de imagen se han propuesto recientemente para la medición de flujo másico. Estos sistemas permiten obtener el flujo másico de manera no intrusiva y con pocas restricciones al tipo de material transportado. El sistema

desarrollado en esta tesis tiene ciertas características que lo hacen atractivo para su uso en instalaciones industriales: Bajo coste de implantación, capacidad de detección del perfil de distribución del haz, inmunidad a los cambios de estructura del flujo, permite la medición fuera de circuitos cerrados, ofrece resistencia a cambios en las condiciones ambientales o de iluminación, permite el multiplexado y puede trabajar a alta frecuencia con alta sensibilidad usando sensores lineales de imagen. Teniendo en cuenta estas características se lo puede considerar una aportación general al campo de transporte neumático de materiales.

7.5.5. Finalmente dar un segundo uso a las instalaciones de recubrimiento por láser

Existen actualmente diversas tecnologías de fabricación aditiva compitiendo en el ámbito de la fabricación con materiales metálicos. Una de ellas es el LMD. A día de hoy comparativamente con otras técnicas de fabricación aditiva, el LMD está por delante en tasa de deposición, espacio de trabajo y abanico de materiales procesables, mientras que las técnicas rivales se adelantan principalmente, en calidad de acabado, resolución, precisión y complejidad de las geometrías depositables. No obstante, el margen entre estas tecnologías se está estrechando con importantes ganancias en términos de espacio de trabajo y tasa de deposición por parte de las tecnologías que rivalizan con el LMD. Este trabajo presenta la posibilidad de añadirle una nueva funcionalidad a la técnica LMD, dándole la capacidad de prototipado de gradientes funcionales, aspecto en que las otras técnicas tienen dificultades para realizar avances significativos. Esto tiene un impacto en la revalorización de la inversión realizada en investigación en los laboratorios que trabajan en procesamiento de materiales con láser dado que, utilizando los mismos métodos que esta tesis, es relativamente sencillo la adaptación de las instalaciones existentes al trabajo multimaterial lo que sin duda puede suponer una amortización beneficiosa para futuros proyectos.

7.6. Trabajo futuro

Ciertos resultados del estudio muestran que existen áreas donde es necesario la continuación del trabajo realizado. Las mediciones del flujo de masa obtenidas en los ensayos muestran una respuesta inadecuada del controlador del sistema mecánico de dosificación de polvo en el alimentador. Es necesario trabajar en el modelo de esta respuesta transitoria en particular, utilizando estrategias de control ya conocidas para servomotores y diseñar un nuevo sistema de control que permita la manipulación adecuada del caudal de polvo y evite las perturbaciones observadas en los ensayos. Es muy probable que para realizar este trabajo haya que construir un alimentador experimental con una correcta sensorización y actuadores. En la misma línea de trabajo es necesario, para aprovechar toda la capacidad de fabricación de piezas multimateriales, desarrollar un sistema de alimentación con más de dos tolvas para generar materiales más complejos. La técnica de procesamiento de gradientes funcionales mediante deposición con láser en la que se ha trabajado no es realmente útil sin la capacidad de operar la máquina con cierto grado de automatización. Uno de los aspectos más importantes del trabajo futuro es implementar todo el proceso de prototipado de FGM en un software CAD/CAM que permita, a partir de la geometría de las piezas, la definición de la distribución de materiales en el espacio y que opere la máquina para la realización del proceso. A partir de ese punto se puede desarrollar el principal objetivo: el estudio de muestras con complejas distribuciones de material para la búsqueda de mejoras en las propiedades mecánicas de la misma y el estudio del comportamiento de materiales heterogéneos cuando se someten a ensayo. También es interesante estudiar la fabricación de un mismo mapa de composición con diferentes planes de trayectorias, el efecto del teselado sobre el comportamiento del gradiente no está lo suficientemente estudiado, aunque es verdad que en la literatura se pueden encontrar casos en los que no se reporta un impacto importante de este sobre la tasa de cambio de composición [29]. No obstante, esto no está comprobado para situaciones donde el cambio de composición ocurre a la vez en dos o más direcciones del espacio, lo que es un importante caso a tener en cuenta. Finalmente es importante continuar con el desarrollo de los sistemas de imagen para la medición del flujo másico. Los resultados muestran que existe un

límite superior al número de partículas que es posible medir causado por las dobles detecciones. Las dobles detecciones son abstraibles a los efectos de una función de covarianza temporal en el valor de cada pixel. El correcto modelado de esta función de covarianza y el estudio de su derivada con respecto al valor de la concentración pueden permitir la mejora del método mediante la adición de términos y parámetros al actual modelo de estimación de partículas. Como consecuencia de esto, el sistema de monitorización de polvo puede hacerse más efectivo en un futuro, dada la importancia para diversas aplicaciones industriales de la medición del flujo másico en el transporte neumático de materiales, este puede ser un área de alto impacto para el trabajo a desarrollar en el futuro.

Bibliografía

- [1] M. B. Bever and P. E. Duwez (1972) Gradients in Composite Materials, Materials Science and Engineering 10
- [2] M. Koizumi (1997) FGM activities in Japan, Composite Part B 28 pp 1-4
- [3] Nabih Cherradi, Akira Kawasaki and Michael Gasik (1994) Worldwide trends in functional gradient materials research and development, Composites Engineering, Vol. 4, No.8, pp. 883-894
- [4] R. M. Mahamood, E. T. Akinlabi, Mukul Shukla and Sisa Pityana (2012) Functionally Graded Material: An Overview, Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K
- [5] B. Kieback, A. Neubrand and H. Riedel (2003) Processing techniques for functionally graded materials, Materials Science and Engineering A362 pp 81-105
- [6] N.P. Karapatis, J.-P.S. van Griethuysen and R. Glardon Direct (1998) Rapid tooling: a review of current research, Rapid Prototyping Journal Volume 4 · Number 2 pp. 77–89
- [7] K. G. Watkins (2001) Achieving the potential of direct fabrication with lasers, International Conference on Laser Assisted Net Shaping (LANE 2001) Erlangen, 28 –31 August, 2001 pp 25 – 38
- [8] D. D. Gu W. Meiners, K. Wissenbach and R. Poprawe (2012) Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, International Materials Reviews VOL 57 pp 133 -164

- [9] Mohammad Vaezi , Srisit Chianrabutra , Brian Mellor and Shoufeng Yang(2013) Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 8, No. 1,pp 19 - 50,
- [10] Oxman Neri, Keating Steven and Tsai (2012) Functionally Graded Rapid Prototyping, Elizabet 5th International Conference on Advanced Research and Rapid Prototypin
- [11] Y. Miyamoto, W. A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki and Renee G. Ford (1999) Functionally graded materials: Design, Processing and Applications, Springer Science+Business Media New York
- [12] Gideon N. Levy, Ralf Schindel and J.P. Kruth (2003) Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives, CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 52, Issue 2, pp 589-609
- [13] Terry Wohlers and Tim Gornet (2012) State of the Industry Wohlers Report 2012, Wohlers Associates Inc
- [14] Fukushima, T., Kuroda, S. and Kitahara S. (1990) Gradient Coatings Formed by Plasma Twin Torches and those Properties. Proceedings of the First Int. Symp., FGM, Sendai, 1990,Functionally Gradient Materials Forum and the Society of Non traditional Technology, Tokyo, pp. 145-150
- [15] Shimoda, N., Kitaguchi, S., Saito, T., Takigawa, H. and Koga (1990) M. Production of Functionally Gradient Materials by Applying Low Pressure Plasma Spray. 'Proceedings of the First Int. Symp., FGM', Sendai, 1990, Functionally Gradient Materials Forum and the Society of Non-traditional Technology, Tokyo, pp. 151-156
- [16] Ehsan Toyserkani, Ami Khajepour and Stephen Corbin (2005) Laser Cladding, CRC PRESS 2005
- [17] Takeda, T.(1984) Laser Cladding with a Mixed Powder Feed. 1984, ICALEO '84

- [18] Monson, P.J.E., W.M. Steen, and D.R.F. West (1987) Rapid Alloy Scanning by Variable Composition Laser Cladding, LAMP '87.
- [19] P. A. Carvalho et al. (1992) Characterization of Co-Ni-Al alloys obtained by variable powder feed rate laser cladding, Presented in the LAMP'92 International Conference on Laser Advanced Materials Processing: Science and Applications, Nagoya, Japan, 1992, High Temperature Society of Japan, pp. 825-830.
- [20] C. L. Sexton et al. (1993) Laser multi powder feeder cladding system for variable composition analysis, Presented in the AMPT'93 International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, University College Dublin, 1993, pp. 1215-1224.
- [21] C. L. Sexton et al. Triple hopper powder system for variable composition laser cladding, Presented in ICALEO '93—Laser Materials Processing, Orlando, FL, 1993, Laser Institute of America, pp. 824-834.
- [22] C. L. Sexton, G. Byrne, and K. G. Watkins (2001) Alloy development by laser cladding: An overview Journal of Laser Applications 13, 2
- [23] K. Mohammed Jasim, R. D. Rawlings and D. R. F. West (1993) Metal-ceramic functionally gradient material produced by laser processing" Journal of Materials Science, Volume 28, Issue 10, pp 2820-2826
- [24] J. H. Abboud, D. R. F. West and R. D. Rawlings (1994) Functionally gradient titanium-aluminide composites produced by laser cladding, Journal of Materials Science, Volume 29, Issue 13, pp 3393-3398
- [25] J. H. Abboud, R. D. Rawlings and D. R. F. West (1995) Functionally graded nickel-aluminide and iron-aluminide coatings produced via laser cladding, Journal of Materials Science, Volume 30, Issue 23, pp 5931-5938
- [26] Multi-material processing by LENS (TM) (1997) Solid Freeform Fabrication Proceedings, September 1997

-
- [27] Fessler J, Nickel A, Link G, Prinz F and Fussell P. Functional gradient metallic prototypes through shape deposition manufacturing.(1997) Solid Freeform Fabrication Proceedings, Austin, TX. p. 521 –528
- [28] M.T. Ensiz and M.L. Griffith (2002) Critical issues for functionally graded material deposition by laser engineered net shaping (LENS®) Proceedings of the 2002 MPIF Laser Metal Deposition Conference, San Antonio, Texas, 8–10 April 2002
- [29] Ki-Hoon Shina, Harshad Natub, Debasish Dutta and Jyotirmoy Mazumder (2003) A method for the design and fabrication of heterogeneous objects Materials and Design 24 pp 339-353
- [30] Lino Costa,Rui Vilar(2009) Laser powder deposition Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 Iss 4 pp. 264 - 279
- [31] D.B. Miracle (2005) Metal matrix composites: From science to technological significance Composites Science and Technology 65 pp 2526-2540
- [32] O. Knotek and E. Lugscheider (1974) Brazing Filler Metals Based on Reacting Ni-Cr-B-Si Alloys 5th AWS International Conference 55th AWS Annual Meeting at Houston, Texas, May 6-10, 1974.
- [33] Nikhilesh Chawla and Krishan K. Chawla (2013) Metal Matrix Composites, Springer Science+Business Media New York
- [34] Rasit Koc and S. K. Kodambaka (2000) Tungsten carbide (WC) synthesis from novel precursors, Journal of the European Ceramic Society 20 pp 1859-1869
- [35] Y. T. Pei and H. M. De Hosson (2000) Graded materials produced by laser cladding, Acta mater. 48 pp 2617-2624
- [36] Sörn Ocyloka, Andreas Weisheita and Ingomar Kelbassa (2010) Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection, Physics Procedia 5 pp 359-367

-
- [37] VishnuThayalan and Robert G. Landers (2006) Regulation of Powder Mass Flow Rate in Gravity-Fed Powder Feeder Systems *Journal of Manufitcturing Processes* Vol. 8/No. 2 pp 121-132
- [38] P.A. Carvalho, N. Braz, M.M. Pontinha , M.G.S. Ferreira, W.M. Steen, R. Vilar and K.G. Watkins (1995) Automated workstation for variable composition laser cladding - its use for rapid alloy scanning.*Surface and Coatings Technology* 72 pp 62-70
- [39] J. M. Amado, J. Montero, M. J. Tobar and A. Yáñez (2012) Ni-based metal matrix composite functionally graded coatings,*Physics Procedia* 39 pp 362-367
- [40] J. M. Amado, M. J. Tobar, A. Yáñez, V. Amigó, J. J. Cande (2011)Crack Free Tungsten Carbide Reinforced Ni(Cr) Layers obtained by Laser Cladding, *Physics Procedia* 12 pp 338-344
- [41] J. M. Amado Paz (2011)Recubrmientos de matriz metalica, Universidad de A Coruña
- [42] Hua Tan, Fengying Zhang, Rujun Wen, Jing Chen, Weidong Huang (2012) Experiment study of powder flow feed behavior of laser solid forming,*Optics and Lasers in Engineering*, 50(3), 391-398.
- [43] Stefan Mann , Leonardo de Melo and Peter Abels (2013) Measurement of particles density distribution of powder nozzles for laser material deposition, In 32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO, pp. 370-375.
- [44] Andrew J. Pinkerton and Lin Li J. (2004) Modelling Powder Concentration Distribution From a CoaxialDeposition Nozzle for Laser-Based Rapid Tooling, *Manuf. Sci. Eng* 126(1),pp. 33-41
- [45] I. Tabernero, A. Lamikiz, E. Ukar, L.N. López de Lacalle and C. Angulo, G. Urbikain, (2010) Numerical simulation and experimental validation of powder flux distribution in coaxial laser cladding, *Journal of Materials Processing Technology* 210, pp. 2125-2134

- [46] Yong Yan. (1996) Flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines, Meas. Sci. Technol. ,7, pp. 1687-1706.
- [47] Marcus, R. D. (2012) Pneumatic conveying of solids. Springer Science & Business Media,
- [48] Yingna Zheng and Qiang Liu. (2011) Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. Measurement. 44 589604.
- [49] Yaoyu Ding, James Warton and Radovan Kovacevic (2016) Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system, Additive Manufacturing, 10, pp. 24-35
- [50] Lie Tang, Jianzhong Ruan, Robert G. Landers, and Frank Liou (2008) Variable Powder Flow Rate Control in Laser Metal Deposition Processes, J. Manuf. Sci. Eng 130(4), 041016
- [51] D. W. Swisher, S. C. Borgelt and K. A. Sudduth (2002) Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement, American Society of Agricultural Engineers, Vol. 45 No. 4 pp. 881–888
- [52] Robert M. Carter and Yong Yan, (2005) An Instrumentation System Using Combined Sensing Strategies for Online Mass Flow Rate Measurement and Particle Sizing, Transaction an instrumentation and measurement, Vol. 54, No. 4, pp.1433-1437
- [53] Ding Song¹, Lihui Peng, Geng Lu, Shiyuan Yang and Yong Yan (2009) Digital image processing based mass flow rate measurement of gas/solid two-phase flow, In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 147, No. 1, p 012048
- [54] R. J. Adrian and J. Westerweel (2011) Image Velocimetry, Cambridge University Press
- [55] E. Lavernia, G. Rai, N J. Grant (1985) Powder Size and Distribution in Ultrasonic Gas Atomization JOM 37, pp. 22-26

-
- [56] Emanuel Parzen (1962) On Estimation of a Probability Density Function and Mode, Ann. Math. Statist., Volume 33, Number 3 , 1065-1076.
- [57] Tuomas Purtonen, Anne Kalliosaari y Antti Salminen (2014) Monitoring and adaptive control of laser processes, Physics Procedia 56, 1218 - 1231.
- [58] X. Lina , T.M. Yuea H.O. Yangb , W.D. Huangb (2005) Laser rapid forming of SS316L/Rene88DT graded material Materials Science and Engineering A 391 325-336
- [59] Leunda, J., Sanz, C. and Soriano, C. (2016). Laser cladding strategies for producing WC reinforced NiCr coatings inside twin barrels. Surface and Coatings Technology, 307, 720-727.